

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Andrija Zaplatić

Zagreb, 2018. godine

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

Doc. dr. sc. Zvonimir Tomičević

Andrija Zaplatić

Zagreb, 2018. godine

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Prije svega, zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Zvonimiru Tomičeviću na vrhunskom mentorstvu, pruženim savjetima, neumornom vodstvu i motiviranju, predanosti, strpljivosti te na vremenu uloženom kako bi mi pomogao izraditi ovaj završni rad.

Također, htio bih se zahvaliti tehničkom suradniku Gordanu Plačku na izdvojenom slobodnom vremenu i pomoći kod pripremanja prihvata za ispitivanje te na podizanju morala tijekom provođenja ispitivanja. Htio bih se ovim putem zahvaliti dijelatnicima Katedre za eksperimentalnu mehaniku prof. dr.sc. Janošu Kodvanju dipl.ing., dr.sc. Martinu Surjaku mag.ing. te Frani Pamukoviću, mag.ing. na savjetima te pomoći oko sustava *Aramis*.

Iskreno se zahvaljujem svojim roditeljima što su mi omogućili studiranje, bratu na strpljivosti i podršci te prijateljima Domagoju, Ani, Petru, Mateu i ostalima što su mi uljepšali preddiplomski studij.

Andrija Zaplatić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Andrija Zaplatić**

Mat. br.: 0035195464

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Eksperimentalno ispitivanje krutosti Arcan prihvata uslijed različitih opterećenja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Experimental investigation of Arcan rigs subjected to different loading regimes**

Opis zadatka:

Ubrzani razvoj industrije zahtjeva proizvodnju sve složenijih mehaničkih komponenti i konstrukcija koji moraju zadovoljiti kriterije kao što su korištenje pri većim i kompleksnijim uvjetima rada. Iz tog razloga potrebno je izvršiti karakterizaciju materijala s obzirom na višeosna opterećenja. Ravninsko stanje naprezanja moguće je narinuti pomoću Arcan dvoosnog prihvata na kojem se osim čistog vlaka i jednostavnog smika mogu narinuti i njihove kombinacije ovisno o pozicioniranju prihvata na ispitni uređaj. Prijašnja istraživanja pokazala su da uslijed nesimetričnosti prirubnice Arcan prihvata dolazi do izvan ravninskog savijanja ispitnog leptirastog uzorka.

U ovom radu je potrebno eksperimentalno odrediti krutost Arcan prihvata uslijed vlačnog, jednostavnog smičnog te kombinacije vlačnog i smičnog opterećenja. Mjerenje pomaka konstrukcije izvršiti pomoću stereo optičkog mjernog sustava Aramis. Tijekom ispitivanja koristiti leptiraste epruvete s dva V zarezra izrađene od čelika DC01. Osim toga, za tri predložena dvoosna opterećenja izmjeriti izvan ravninskog savijanje ispitnog uzorka.

Tijekom rada potrebno je:

1. Upoznati se s radom statičke kladice i optičkog mjernog sustava Aramis.
2. Odrediti polje pomaka na prirubnicama Arcan prihvata i leptirastoj epruveti.
3. Analizirati savijanje leptirastog ispitnog uzorka izrađenog od čelika DC01 uslijed različitih opterećenja.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Zvonimir Tomičević

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
2. VIŠEOSNA ISPITIVANJA	3
3. JEDNOOSNA ISPITIVANJA.....	7
3.1. Jednoosno vlačno ispitivanje	8
3.1.1. Idealizacija dijagrama deformiranja.....	10
3.1.2. Youngov modul E	13
3.1.3. Poissonov koeficijent ν	14
3.2. Jednoosno smično ispitivanje.....	15
3.2.1. Modul smicanja G	16
3.3. Teorije čvrstoće.....	16
3.3.1. Teorija najvećeg normalnog naprezanja	17
3.3.2. Teorija najveće duljinske deformacije.....	18
3.3.3. Teorija najvećeg posmičnog naprezanja	19
3.3.4. Teorija najveće distorzijske energije	20
3.3.5. Usporedba teorija čvrstoće.....	22
4. VIŠEOSNI ARCAN PRIHVAT	23
4.1. Izvedba i problemi	24
4.2. Rezultati numeričke analize	25
4.2.1. Smično opterećenje.....	28
4.2.2. Vlačno opterećenje	29
4.2.3. Kombinacija smičnog i vlačnog opterećenja pod 45°	30
5. METODA KORELACIJE DIGITALNIH SLIKA	32
5.1. Optički sustav Aramis	33
5.1.1. Priprema mjernog objekta	34
5.1.2. Nanošenje stohastičkog uzorka na površinu mjernog objekta	34

5.1.3. Podešavanje i kalibracija sustava	35
5.1.4. Provedba snimanja mjernog objekta.....	36
5.1.5. Pohrana i obrada digitalnih slika	36
6. PROVEDBA EKSPERIMENTA	38
7. REZULTATI	43
7.1. Ispitivanje vlačnim opterećenjem	43
7.2. Ispitivanje na smično opterećenje	45
7.3. Ispitivanje na kombinirano vlačno i smično opterećenje pod 45°	48
8. DISKUSIJA	51
9. ZAKLJUČAK.....	53
LITERATURA.....	55

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Zwick-Roell dvoosni prihvata za križni ispitni uzorak [1]	3
Slika 2.2. Troosni uređaj ASTREE [2].....	4
Slika 2.3. 6-osni stroj s odgovarajućim digitalnim kamerama [3].....	5
Slika 2.4. CAD model 6-osnog ispitnog uređaja [3]	5
Slika 2.5. Oblik i dimenzije ispitnog uzorka za 6-osno ispitivanje [3]	6
Slika 2.6. Prikaz opterećenja uzorka na 6-osnom stroju za ispitivanje [3]	6
Slika 2.7. Prikaz pretpostavljene putanje pukotine [3].....	6
Slika 3.1. Ispitni uzorak kružnog poprečnog presjeka za vlačno ispitivanje [5]	8
Slika 3.2. Konvencionalni dijagram napreznja i deformacije [6].....	9
Slika 3.3. Konvencionalna granica tečenja za plastične deformacije 0,01% i 0,2% [4]	10
Slika 3.4. Kruto-idealno plastičan materijal [6]	11
Slika 3.5. Elastično-idealno-plastičan materijal [6].....	11
Slika 3.6. Kruto linearno-očvršćujući materijal [6].....	12
Slika 3.7. Elastično linearno-očvršćujući materijal [6]	12
Slika 3.8. Ramberg-Osgoodov materijalni model	13
Slika 3.9. Uzdužna i poprečna kontrakcija materijala uslijed vlačnog opterećenja [9].....	14
Slika 3.10. Eksperimentalni postav za smično ispitivanje vijaka, svornjaka i zatika.....	15
Slika 3.11. Krivulja čvrstoće za teoriju najvećeg normalnog napreznja	17
Slika 3.12. Površina čvrstoće za teoriju najvećeg normalnog napreznja	18
Slika 3.13. Krivulja čvrstoće za teoriju najveće duljinske deformacije	19
Slika 3.14. Ploha čvrstoće po teoriji najvećeg posmičnog napreznja [11]	20
Slika 3.15. Ploha čvrstoće po teoriji distorzijske energije [11]	21
Slika 3.16. Usporedba teorija čvrstoća [11]	22
Slika 4.1. Shema Iosipescu metode ispitivanja [12].....	23
Slika 4.2. Shematski prikaz Arcan prihvata [12].....	24
Slika 4.3. Prikaz Arcan prihvata za različita opterećenja [13]	24
Slika 4.4. Tri karakteristična slučaja opterećenja: a) vlak, b) smik, c) kombinacija [14]	25
Slika 4.5. Proračunski model [14]	25
Slika 4.6. Prikaz opterećenja i rubnih uvjeta proračunskog modela [14].....	26
Slika 4.7. Utjecaj pomaka U_3 ovisno o debljini prirubnice pri deformaciji $\approx 20\%$: a) početna geometrija, b) $T_{\text{prirubnice}} = 29 \text{ mm}$, c) $T_{\text{prirubnice}} = 50 \text{ mm}$ [14].....	26

Slika 4.8. Savijanje leptiraste epruvete pri deformaciji $\approx 20\%$ ovisno o debljini priрубnice: a) $T_{prir} = 29$ mm, b) $T_{prir} = 50$ mm.....	27
Slika 4.9. Utjecaj debljine uzorka na savijanje pri deformaciji $\approx 20\%$: a) $T_{uzorka} = 1$ mm, b) $T_{uzorka} = 3$ mm, c) $T_{uzorka} = 5$ mm [14].....	27
Slika 4.10. Konačni proračunski model i prikaz tlačnog prihvata [14]	28
Slika 4.11. Prikaz: a) naprezanje prema von Misesu, b) deformacija, MPa [14]	28
Slika 4.12. Raspodjela pomaka: a) ukupni pomak, b) pomak u smjeru osi y, c) pomak u smjeru osi x, d) pomak u smjeru osi z [14].....	29
Slika 4.13. Prikaz: a) naprezanje prema von Misesu, b) deformacija [14].....	29
Slika 4.14. Raspodjela pomaka: a) ukupni pomak, b) pomak u smjeru osi x, c) pomak u smjeru osi y, d) pomak u smjeru osi z [14]	30
Slika 4.15. Prikaz pomaka u smjeru osi z za vlačno ispitivanje [14]	30
Slika 4.16. Prikaz: a) naprezanje prema von Misesu, b) deformacija [14].....	31
Slika 4.17. Raspodjela pomaka: a) ukupni pomak, b) pomak u smjeru osi x, c) pomak u smjeru osi y, d) pomak u smjeru osi z [14]	31
Slika 5.1. Shematski prikaz DIC mjerenja s dvije kamere primjenom korelacije digitalne slike [15]..	32
Slika 5.2. Primjer stohastičkog rastera i crveno označena provokutna faseta u: a) referentnoj konfiguraciji, b) deformiranoj konfiguraciji	32
Slika 5.3. Optički mjerni sustav Aramis [16]	33
Slika 5.4. Stohastički uzorak s primjerom dobrog kontrasta	34
Slika 5.5. Primjeri stohastičkih uzoraka za različite mjerne volumene [17]	35
Slika 5.6. Ilustracija sustava Aramis s potrebnim parametrima za podešavanje [15]	35
Slika 5.7. Kalibracijski uređaji [15]	36
Slika 5.8. Faseta veličine 15x15 s 2 preklapajuća piksela.....	37
Slika 5.9. Ovisnost mjerne nesigurnosti pomaka i deformacija o veličini fasete [18]	37
Slika 6.1. Odabrani mjerni objekt veličine 90x72 mm.....	38
Slika 6.2. Ispitni uzorak: a) bez rastera, b) s rasterom.....	39
Slika 6.3. Dimenzije ispitnog uzorka	39
Slika 6.4. Postavljena priрубnica: a) s ispitnim uzorkom, b) s postavljenim tlačnim prihvatom, c) s postavljenim vijcima, podloškama i maticama, d) pogled na prihvata sa stražnje strane ..	40
Slika 6.5. Postavljene kamere ispred prihvata.....	41
Slika 6.6. Slika postavljenog ispitnog uzorka za ispitivanje vlačnog opterećenja sa: a) lijeve kamere, b) desne kamere	41
Slika 6.7. Slika postavljenog ispitnog uzorka za ispitivanje smičnog opterećenja sa: a) lijeve kamere, b) desne kamere	41
Slika 6.8. Slika postavljenog ispitnog uzorka za ispitivanje kombiniranog vlačnog i smičnog opterećenja sa: a) lijeve kamere, b) desne kamere.....	42

Slika 6.9. Položaj prihvata za: a) vlačno opterećenje, b) smično opterećenje, c) kombinirano smično i vlačno opterećenje	42
Slika 7.1. Polje pomaka u smjeru osi z za <i>Stage</i> 100 za ispitivanje vlačnog opterećenja	44
Slika 7.2. Polje pomaka u smjeru osi z za <i>Stage</i> 152 za ispitivanje vlačnog opterećenja	44
Slika 7.3. Polje deformacije po Misesu za <i>Stage</i> 100 za ispitivanje vlačnog opterećenja	45
Slika 7.4. Deformirani ispitni uzorak uslijed vlačnog opterećenja.....	45
Slika 7.5. Polje pomaka u smjeru osi z za <i>Stage</i> 152 za ispitivanje jednostavnog smičnog opterećenja	46
Slika 7.6. Polje pomaka u smjeru osi z za <i>Stage</i> 272 za ispitivanje jednostavnog smičnog opterećenja	46
Slika 7.7. Polje deformacije po Misesu za <i>Stage</i> 152 za ispitivanje smičnog opterećenja.....	47
Slika 7.8. Deformirani ispitni uzorak uslijed smičnog opterećenja.....	47
Slika 7.9. Polje pomaka u smjeru osi z za <i>Stage</i> 160 za ispitivanje kombiniranog opterećenja.....	48
Slika 7.10. Polje pomaka u smjeru osi z za <i>Stage</i> 189 za ispitivanje kombiniranog opterećenja.....	49
Slika 7.11. Polje deformacije po Misesu za <i>Stage</i> 160 za ispitivanje kombiniranog vlačnog i smičnog opterećenja pod 45°	49
Slika 7.12. Deformirani ispitni uzorak uslijed kombiniranog vlačnog i smičnog opterećenja pod 45° . (1) i (2) označavaju zone gužvanja materijala.	50
Slika 8.1. Dijagram sile i ekvivalentne deformacije	51

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrste ispitivanja i ciljevi [4]	7
Tablica 2. Usporedba sila kod vlačnog, smičnog i kombiniranog opterećenja za tri karakteristične vrijednosti deformacije	52
Tablica 3. Usporedba maksimalnih sila kod vlačnog, smičnog i kombiniranog opterećenja.....	52
Tablica 4. Usporedba maksimalnih deformacija kod vlačnog, smičnog i kombiniranog opterećenja ..	52

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
d_0	mm	Početni promjer epruvete
L_0	mm	Početna mjerna duljina epruvete
S_0	mm ²	Početna površina poprečnog presjeka epruvete
E	GPa	Youngov modul elastičnosti
F	N	Sila
K	-	Parametar materijala
n	-	Parametar materijala
ΔL	mm	Produljuje ispitnog uzoraka
R_{m0}	MPa	Smična čvrstoća
G	GPa	Coulombov modul smicanja
S	-	Faktor sigurnosti
U_{od}	kg/m ³	Gustoća distorzijske energije
$U_{od\ dop}$	kg/m ³	Dopuštena gustoća distorzijske energije
R	mm	Polumjer valjka
σ	MPa	Naprezanje
ε	-	Deformacija
σ_T	MPa	Granica tečenja materijala
ε_0	-	Trajna plastična deformacija
ν	-	Poissonov koeficijent
$\varepsilon_{poprečno}$	-	Poprečna deformacija
$\varepsilon_{uzdužno}$	-	Uzdužna deformacija
γ_{xy}	-	Kutna deformacija
σ_{ekv}	MPa	Ekvivalentno naprezanje
σ_{max}	MPa	Najveća apsolutna vrijednost glavnih naprezanja
σ_{dop}	MPa	Dopušteno naprezanje
σ_M	MPa	Vlačna čvrstoća

ε_{max}	-	Najveća apsolutna vrijednost duljinske deformacije
τ_{dop}	MPa	Dopušteno smično naprezanje
τ_{max}	MPa	Najveće posmično naprezanje
α	°	Kut zakreta prihvata

SAŽETAK

Određivanje ponašanja materijala pri višeosnom opterećenju izazov je mnogim istraživačima budući je većina inženjerskih konstrukcija i komponenti tijekom eksploatacije podvrgnuta kompleksnim režimima opterećenja. Zbog nedostupnosti ispitnih višeosnih uređaja ne postoji mnogo podataka o ponašanju materijala uslijed proporcionalnih i neproporcionalnih kompleksnih uvjeta opterećenja te se stoga većinom provode normama regulirana ispitivanja na jednoosnim mehaničkim ispitnim uređajima. Tijekom višeosnih ispitivanja mjerenje deformacija nije moguće provesti primjenom klasičnih ekstenzometara već se primjenjuju mjerne trake (tj. tenzometri) koje se postavljaju na pretpostavljena kritična mjesta ispitnog uzorka. Nedostatak primjene mjernih traka je određivanje odziva materijala uslijed višeosnog opterećenja u samo nekoliko točaka te je nemoguće predvidjeti u kojoj zoni će nastupiti oštećenje materijala. Razvojem optičkih metoda mjerenja cijelog polja pomaka i/ili deformacija omogućuju analizu odziva materijala u cijeloj zoni interesa. Najčešće korištena optička mjerna tehnika u eksperimentalnoj mehanici je metoda korelacija digitalne slike. Osim toga, propisivanjem rubnih uvjeta izmjerenih predloženom metodom u numeričke modele moguće je identificirati parametre različitih konstitutivnih zakona te odrediti naprezanja koja se javljaju kod višeosno opterećenog uzorka.

U ovom radu provedena su ispitivanja na višeosnom Arcan prihvatu koji se primjenjuje na jednoosnim kidalicama. Karakteristični leptirasti ispitni uzorci izrađeni su od čelika DC01 te su ispitani uslijed vlačnog, smičnog i kombiniranog opterećenja. Vlačno i smično opterećenje podjednako su zastupljeni kod kombiniranog opterećenja budući je Arcan prihvata pozicioniran pod kutem od 45° s obzirom na traverzu jednoosne kidalice. Tijekom ispitivanja korišten je stereo optički mjerni sustav *Aramis* kojim su izmjerena polja pomaka i deformacija promatrane zone interesa. Na temelju izmjerenih polja pomaka i deformacija analizirani su izvan ravninski pomaci leptirastog ispitnog uzorka kod tri predložena režima opterećenja.

Ključne riječi: Arcan prihvata, ravninsko stanje naprezanja, korelacija digitalne slike, optički mjerni sustav *Aramis*, izvan ravninsko savijanje

SUMMARY

Determination of material behaviour under multiaxial load is a challenge to many researchers since most of the engineering structures and components are subject to complex loading regimes during their exploitation. Due to the unavailability of the multiaxial testing machines there is not sufficient experimental data considering material behaviour under proportional and unproportional complex loading conditions. Consequently, the majority of the experimental investigations are performed on the uniaxial mechanical testing devices since they are defined by corresponding norms. While conducting multiaxial tests it is not possible to measure with classic extensometers. However, strain gauges are used instead. They are positioned on predicted critical areas of the test sample. The strain gauges can only obtain material response only in a few points of the specimen. Thus it yields as their disadvantage since it is impossible to predict location of damage initiation. With the development of full-field measurement techniques (i.e. methods applied to determine displacement and/or strain fields) it is possible to analyze material behaviour in the whole zone of interest. The most widely applied optical method in experimental mechanics community for measuring displacement and strain fields is digital image correlation (DIC). Furthermore, prescribing the boundary conditions, measured via proposed method, onto finite element models enables identification of constitutive law parameters. Moreover, it is possible to access stress distribution on different test samples subjected to multiaxial loading regimes.

In this work, three experiments have been conducted on uniaxial testing machine with application of the newly developed multiaxial Arcan rigs. Corresponding butterfly samples made from DC01 steel were investigated under tensile, shear and combined loading regimes. The combined loading is defined with equally prescribed tensile and shear loadings. Hence, the multiaxial grips were rotated for 45° with respect to loading axis of the testing. During proposed investigation a stereo optical measuring system *Aramis* was used to capture displacements and strains of the observed zone of interest. The measured displacement and strain fields have been used to analyze the out of plane bending phenomena occurring on the butterfly samples under three proposed load regimes.

Keywords: Arcan rigs, plane stress, digital image correlation, optical measuring system
Aramis, out of plane bending

1. UVOD

Razvitkom industrije razvijaju se sve noviji materijali i složenije konstrukcije koje moraju ispunjavati određene konstrukcijske zahtjeve tijekom eksploatacije. Inženjerska konstrukcija mora izdržati sva narinuta i vanjska opterećenja složena. Jedan od glavnih izazova prilikom razvitka novih materijala je poznavati odziv predloženog materijala uslijed različitih jednostavnih i složenih opterećenja. Kako bi se što pouzdanije procijenila izdržljivost inženjerske konstrukcije provode se numeričke simulacije te različita mehanička eksperimentalna ispitivanja. Osim toga, razvoj materijala posljedično potiče i razvoj naprednih metoda analize integriteta konstrukcije. Bitne karakteristike materijala poput granice elastičnosti, granice tečenja te granice razvlačenja mogu se dovoljno točno odrediti primjenom eksperimentalnih ispitivanja, jednoosnih ili višeosnih. Višeosna ispitivanja te uređaji za višeosna ispitivanja su skupa te su manje dostupna od jednoosnih ispitivanja. No međutim, višeosna ravninska ispitivanja moguće je provoditi i korištenjem jednoosne kidalice te odgovarajućeg mehaničkog prihvata. Prilikom takvih eksperimentalnih istraživanja potrebno je koristiti odgovarajući ispitni uzorak. Primjenom Arcan prihvata na leptirasti ispitni uzorak omogućen je prijenos vlačnog, tlačnog, smičnog i kombiniranog opterećenja koje je definirano pozicioniranjem predloženog prihvata s obzirom na vertikalnu os kidalice. Izuzetno bitna karakteristika Arcan prihvata je upravo mogućnost ispitivanja materijala uslijed različitih ravninskih stanja naprezanja a posljedično postaju dostupni podaci kojima je moguće pouzdanije odrediti ponašanje materijala. No međutim, uslijed nesavršenosti konstrukcije predloženog prihvata i ispitnog uređaja mogu se javiti dodatna opterećenja (npr. savojno).

Kako bi se odredio odziv mehanički ponašanja materijala prilikom ispitivanja koriste se različite mjerne metode pomaka i/ili deformacija. U ovom radu naglasak je na metodi korelacije digitalne slike. Mehanički ispitni uređaj zabilježava promjenu sile tijekom opterećenja, a pomoću metode digitalne korelacije određuju se pomaci na ispitnom uzorku. Iz predloženih podataka se dalje mogu odrediti naprezanja, deformacije te identificirati ostali potrebni parametri materijala.

Cilj ovoga rada je procijeniti odziv materijala s obzirom na tri različite vrste opterećenja. Tijekom eksperimentalnog ispitivanja primjenom komercijalnog optičkog sustava izmjeriti će se polja pomaka te procijeniti koliki je utjecaj konstrukcijske nesavršenosti novorazvijenog

Arcan prihvata. Poseban naglasak tijekom analize rezultata dobivenih metodom korelacije digitalne slike biti će dana poljima pomaka u smjeru osi okomite na ravninu ispitnog uzorka kako bi se procijenilo izvan ravninsko savijanje. Leptirasti ispitni uzorci izrađeni su iz konstrukcijskog čelika DC01.

Osim uvodnog poglavlja rad se sastoji od preostalih sedam. U drugom poglavlju ovog rada opisani su neki primjeri višeosnih mehaničkih uređaja (npr. heksapod, *Zwick-Roell* dvoosna ravninska kidalica za križni ispitni uzork, *Astree* troosoni ispitni uređaj). U trećem poglavlju predstavljena su jednostavna jednoosna ispitivanja s narinutim vlačnim i smičnim opterećenjem. Za svako ispitivanje je objašnjeno kako se izvodi te koji su ishodi ispitivanja. U četvrtom poglavlju opisan je novorazvijeni Arcan prihvata koji je imao cilj smanjivanja izvan ravninsko savijanje ispitnog uzorka prilikom vlačnom ispitivanja te su stoga prikazani rezultati numeričkih simulacija s obzirom na promjene u konstrukciji. U petom poglavlju opisana je metoda korelacije digitalne slike te stereo optički mjerni sustav *Aramis*. Objašnjen je postupak kalibracije korelacijskog sustava te provođenja mjerenja. U šestom poglavlju ovog rada opisana je priprema i provedba tri ispitivanja primjenom modularnog Arcan prihvata. Provedena su ispitivanja na vlačno, jednostavno smično te na kombinirano vlačno i smično opterećenje pod kutem od 45° . U sedmom poglavlju analizirani su rezultati ispitivanja, dok je u osmom poglavlju provedena diskusija s obzirom na odziv materijala tijekom različitih režima opterećenja.

2. VIŠEOSNA ISPITIVANJA

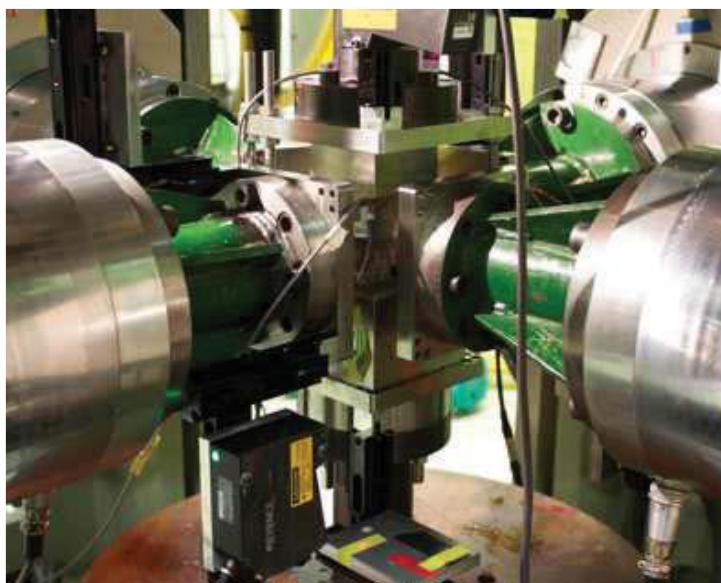
Mehanička višeosna ispitivanja najčešće se provode s ciljem postizanja dvoosnog stanja naprezanja. Prilikom provođenja dvoosnih eksperimentalnih istraživanja četiri neovisna linearna aktuatora koriste se za prenošenje opterećenja. Dvoosne mehaničke kidalice izrađuju se u vertikalnoj i horizontalnoj izvedbi (tj. križni ispitni uzorak nalazi se u vertikalnoj ili horizontalnoj ravnini). Četiri linearna aktuatora omogućuju prijenos opterećenje u ravnini ispitnog uzorka tako da su po dva linearna aktuatora smještena na dvije međusobno okomite osi te mogu biti neovisno kontrolirana.

Linearnim pomakom četiri aktuatora moguće je tijekom ispitivanja propisati vlačno, tlačno ili smično opterećenje ali i kombinacije predloženih opterećenja. Štoviše, ovisno o odabranom programu opterećenja moguće je narinuti proporcionalno ili neproporcionalno opterećenje. Svrha dvoosnih ispitivanja je utvrđivanje mehaničkog ponašanja materijala uslijed različitih ravninskih stanja naprezanja koja se javljaju uslijed eksploatacije realnih inženjerskih konstrukcija. Na slici 2.1. prikazana je izvedba dvoosne mehaničke kidalice konstruirane i izrađene od tvrtke *Zwick-Roell*. Tijekom provođenja dvoosnih eksperimenata s opterećenjem na vlak i/ili tlak potrebno je osigurati da centar epruvete ostane nepomičan. Najveći izazov kod provođenja dvoosnih ispitivanja je konstruiranje odgovarajućih križnih uzoraka. Optimizacija geometrije i dimenzija provodi se s ciljem postizanja najvećih naprezanja u središtu ispitnih uzoraka.



Slika 2.1. *Zwick-Roell* dvoosni prihvatač za križni ispitni uzorak [1]

Višeosna mehanička ispitivanja moguće je provesti i na troosnim kidalicama. Pregledom tržišta i literature utvrđeno je kako se troosna mehanička ispitivanja provode rijede zbog cjenovne nedostupnosti odgovarajućih ispitinih uređaja. Jedan od rijetkih primjera troosnog ispitnog uređaja je ASTREE (Slika 2.2) koji se nalazi u laboratoriju LMT Cachan, Francuska. Troosna mehanička ispitivanja se provode na ispitnim uzorcima koji imaju početni oblika kocke ili paralelopipeda, a postavljaju se između šest pomičnih blokova koji se mogu međusobno relativno gibati. Predloženo ispitivanje se provodi pomicanjem šest nezavisnih akuatora troosne kidalice.



Slika 2.2. Troosni uređaj ASTREE [2]

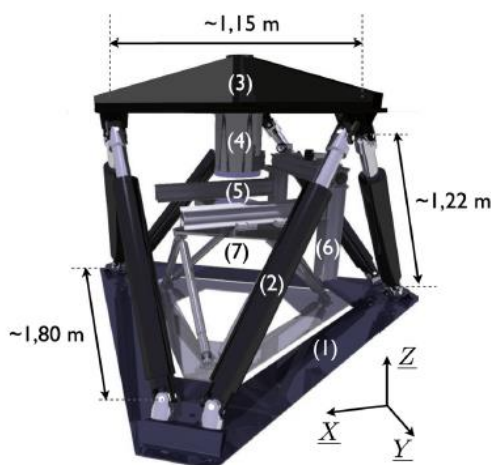
Jedna od novijih metoda višeosnog mehaničkog ispitivanja je pomoću 6-osnog ispitnog uređaja heksapod (Slika 2.3). Pregledom dosadašnjih istraživanja provedenih na predloženom ispitnom uređaju utvrđeno je kako se koristi za inicijaciju i propagaciju pukotine s po pretpostavljenoj putanji (tj. narinuto opterećenje uzrokuje razvoj pukotine u točno određenim smjerovima). Odziv materijala određuje se pomoću senzora pomaka i kamera smještenih na konstrukciji stroja. Tijekom provedbe eksperimenta u realnom vremenu se koristi globalni pristup metode korelacije digitalne slike s kojim je kontroliran ispitni uređaj [3].



Slika 2.3. 6-osni stroj s odgovarajućim digitalnim kamerama [3]

CAD model 6-osnog elektromehaničkog ispitnog stroja prikazan jena slici 2.4. Baza predloženog ispitnog uređaja je Bosch-Rexoth *hexapod* robot [3] koji se sastoji se od:

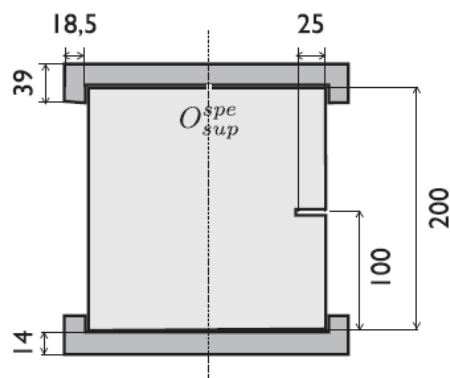
1. baze,
2. aktuatora,
3. pomične platforme,
4. gornjeg dijela izvršnog članka robota (efektor),
5. prostora za postavljanje i opterećivanje uzorka,
6. optičkog sustava s dvije kamere i
7. pasivnog *hexapod*.



Slika 2.4. CAD model 6-osnog ispitnog uređaja [3]

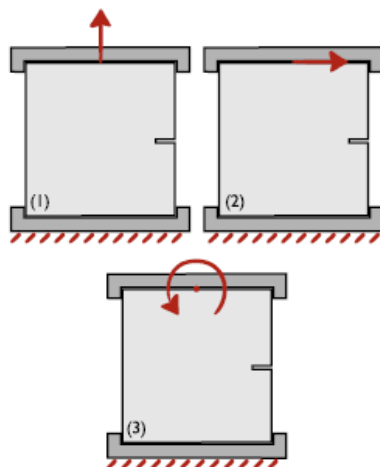
Nazivno opterećenje 6-osnog ispitnog uređaju ovisi o poziciji izvršnog članka. Procijenjene vrijednosti opterećenja u smjeru osi Z iznose 120kN i 70kNm, te 50kN i 45kNm u X-Y ravnini. Tijekom ispitivanja osiguranje prostor za maksimalni pomak od $\pm 250\text{mm}$, te je

omogućena rotacija od $\pm 22^\circ$ s obzirom na X, Y i Z osi. Uzorak koji se ispitivao na 6-osnom elektromehaničkom stroju [3] je paralelopiped izrađen od betona. Dimenzije uzorka sa zarezom prikazane su na slici 2.5.

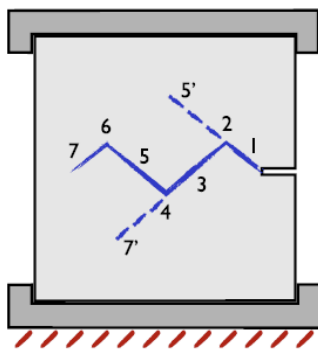


Slika 2.5. Oblik i dimenzije ispitnog uzorka za 6-osno ispitivanje [3]

Opterećenja (Slika 2.6.) koja se primjenjuju na uzorak tijekom ispitivanja na šesteroosnom heksapodu su vlak (1), smik (2) i savijanje (3). Propisana opterećenja izazivaju inicijaciju, propagaciju i reorijentaciju pukotine koja prati cik-cak putanju (Slika 2.7.).



Slika 2.6. Prikaz opterećenja uzoraka na 6-osnom stroju za ispitivanje [3]



Slika 2.7. Prikaz pretpostavljene putanje pukotine [3]

3. JEDNOOSNA ISPITIVANJA

Kako bi se mogla provoditi višeosna ispitivanja potrebno je prvo razumjeti i opisati mehaničko ponašanje materijala pri jedostavnom jednoosnom opterećenju. U ovom radu neće biti opisana ispitivanja na puzanje i relaksaciju te na dinamičku izdržljivost budući da su to eksperimenti koji se provode tijekom duljeg vremenskog perioda. Uslijed eksploatacije realnih inženjerskih konstrukcija potrebno je razumjeti, opisati te predvidjeti kako će različita opterećenja (jednostavna i složena) utjecati na strukturu i funkcionalnost materijala. Glavni cilj ispitivanja materijala je određivanje temeljnih i uporabnih vrijednosti materijala. S obzirom na potrebne karakteristike razlikuju se šest vrsta ispitivanja materijala (Tablica 1.).

U ovom poglavlju detaljno će biti opisana provedba i analiza jednoosnog vlačnog i smičnog ispitivanja. Budući da se tijekom kompleksnih opterećenja javljaju višeosna stanja naprezanja potrebno je odrediti ekvivalentno naprezanje. Analitički način proračunavanja konstrukcije na višeosna opterećenja određen je izvodom ekvivalentnog naprezanja preko teorija čvrstoća koje će također biti prezentirane u ovom radu.

Tablica 1. Vrste ispitivanja i ciljevi [4]

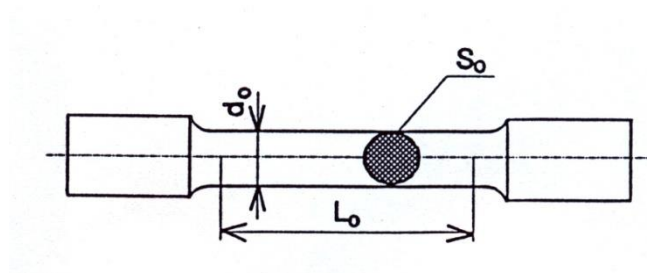
Vrsta ispitivanja	Rezultati
Mehanička	Temeljna svojstva materijala: čvrstoća, žilavost, tvrdoća
Tehnološka	Uporabna svojstva materijala: deformabilnost, zavarljivost
Metalografska	Strukturna svojstva, veličine zrna
Kemijska	Sastav materijala, otpornost prema koroziji
Fizikalna	Toplinska, električna, magnetna, optička svojstva
Defektoskopska	Nerazorne metode koje otkrivaju nevidljive greške

Jednoosna eksperimentalna ispitivanja provode se najčešća zbog dostupnosti ispitnih uređaja te normama definiranih eksperimentalnih metoda. Standardna ispitivanja mehaničkih svojstava na vlak, tlak, savijanje, torziju i smik provode se na jednoosnim kidalicama. Pri jednoosnim ispitivanjima određuju su mehanički parametri materijala koji odgovaraju narinutoj vrsti opterećenja poput: vlačne čvrstoće, tlačne čvrstoće, Youngova modula elastičnosti, modula smicanja itd. Ako su određene komponente naprezanja u realnim

konstrukcijama zanemarive u usporedbi s drugom onda se ispitivanja provode samo za prevladavajuća naprezanja budući će ona imati najviše utjecaja na konstrukciju.

3.1. Jednoosno vlačno ispitivanje

Jednoosna vlačna ispitivanja provode se prema normi HRN EN ISO 6892-1 koja određuje postupak vlačnog ispitivanja metalnih materijala i definira značajke mehaničkih svojstava pri sobnoj temperaturi [5]. Elastično i plastično ponašanje te mehaničke karakteristike materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog ispitivanja određuju se statičkim vlačnim pokusom na uređajima koji se nazivaju kidalice. Ovim ispitivanjem utvrđuju se osnovna mehanička svojstva materijala, poput vlačne čvrstoće, granice elastičnosti, modula elastičnosti, Poissonovog faktor. Na ispitnim uređajima uzorci kružnog (slika 3.1.) ili pravokutnog poprečnog presjeka opterećuju se kontinuirano vlačnim naprezanjima do loma. Vlačni ispitni uzorak zadebljan je na krajevima budući se na tom dijelu prihvaća u čeljusti kidalice. Geometrija predloženog ispitnog uzorka sa zadebljanim krajevima osigurava da se lom pojavi u promatranoj zoni interesa (promatrana zona interesa definirana je duljinom L_0).



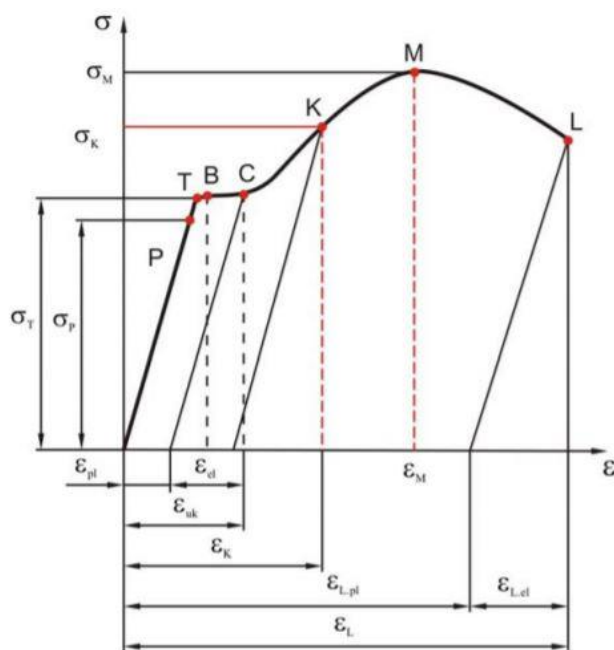
Slika 3.1. Ispitni uzorak kružnog poprečnog presjeka za vlačno ispitivanje [5]

Veličine koje definiraju dimenzije epruvete su:

d_0 – početni promjer epruvete, [mm]

L_0 – početna mjerna duljina epruvete, [mm]

S_0 – početna površina poprečnog presjeka epruvete, [mm²]. [5]



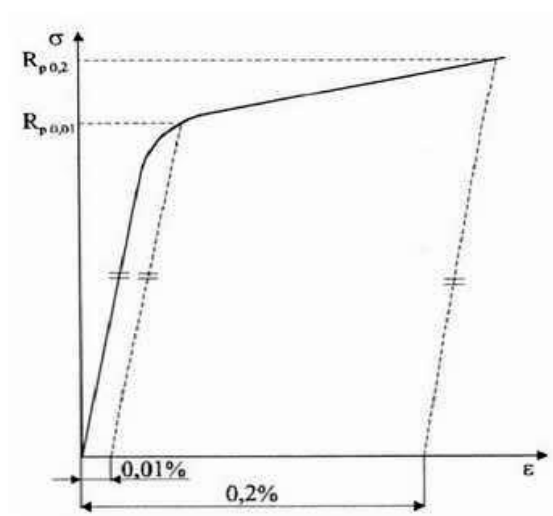
Slika 3.2. Konvencionalni dijagram napreznja i deformacije [6]

Monotonim opterećivanjem ispitnog uzorka, izdužuje se po linearnom zakonu sve do točke P , tj. do granice proporcionalnosti koja ovisi o ispitivanom materijalu. U tom području vrijedi Hookeov zakon te materijal ima linearno elastično ponašanje koje glasi:

$$\sigma = \varepsilon E, \quad (3.1)$$

gdje je σ napreznje, ε deformacija, a E modul elastičnosti materijala. Od granice proporcionalnosti do granice elastičnosti (koja se nalazi neposredno iznad granice proporcionalnosti) materijal se i dalje ponaša elastično po nelinearnom zakonu. Granica elastičnosti predstavlja najviše napreznja kod kojeg se materijal ponaša elastično te nakon rasterećenja mjerni dio epruvete se potpuno vraća u prvobitni oblik. Granica tečenja materijala σ_T (Slika 3.2.) je ono napreznje pri vlačnom opterećenju (vlačnom ispitivanju) koje izaziva znatno istežanje ispitnog uzorka ili epruvete, bez povećanja sile. Razlikuju se *gornja granica tečenja* i *donja granica tečenja*. Nakon točke T (Slika 3.2.) ispitni uzorak se rasteže pri približno konstantnoj sili F , što znači i pri konstantnom napreznju σ_0 . Nakon točke B napreznje ponovno počinje rasti zbog očvršćenja materijala plastičnim deformiranjem. U točki M (Slika 3.2.) napreznje σ postiže maksimum. Nakon točke M materijal se počinje ponašati nestabilno, tj. pri porastu deformacije opada sila F , a time i napreznje σ . Te se veličine smanjuju zbog pojave lokalnog suženja epruvete koje se naziva vrat ispitnog uzorka. Napreznje koje odgovara točki M naziva se *vlačna čvrstoća*. U točki L nastaje lom ispitnog uzorka (Slika 3.2.). Horizontalni dio dijagrama napreznje istežanje

(Slika 3.2.) od točke T do točke C naziva se *plastični plato*. Pri rastezanju epruvete od točke T do točke C plastične deformacije nisu jednoliko raspodijeljene, te se pojedina uska područja (*Lüdersove linije*) plastificiraju. Kod duktilnijih materijala, granicu elastičnosti i granicu tečenja je teže odrediti te se dogovorno uvode pojmovi *prividne (Johnsonove) granice elastičnosti* i *konvencionalne granice tečenja*. Prividna (Johnsonova) granica elastičnosti σ_{EJ} odgovara naprezanju pri kojem je nagib tangente na dijagram $\sigma=\sigma(\varepsilon)$ za 50% manji od nagiba tangente u ishodištu, dok je konvencionalna granica tečenja $\sigma_{0,2}$ naprezanje koje izaziva trajnu plastičnu deformaciju od $\varepsilon_0 = 0,002$ (0,2%) [7].



Slika 3.3. Konvencionalna granica tečenja za plastične deformacije 0,01% i 0,2% [4]

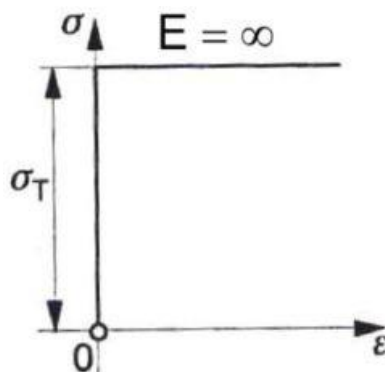
3.1.1. Idealizacija dijagrama deformiranja

Stvarni dijagrami deformiranja metalnih materijala su kompleksni u svojem plastičnom području. Stoga se zbog olakšavanja analitičke obrade nelinearno plastično područje zamjenjuju idealiziranim pravcima koji pouzdano opisuju nelinearno ponašanje materijala. Idealizirani dijagrami zadržavaju bitne značajke stvarnih dijagrama, dok su zanemarive pojedinosti dijagrama ispuštene [7].

U nastavku će biti opisano pet primjera idealiziranih σ - ε dijagrama.

a) Kruto-idealno plastičan materijal

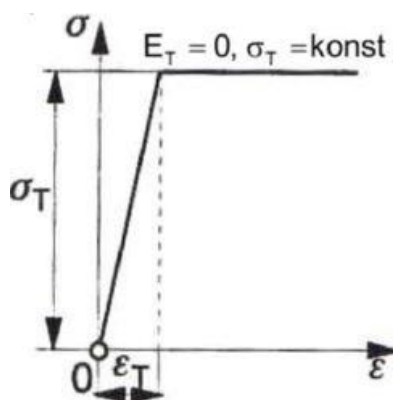
Ovakva idealizacija materijala (Slika 3.4.) koristi se pri obradi materijala deformiranjem pri kojem su zanemarene elastične deformacije. Nelinearno (plastično) područje ponašanja materijala opisano je konstantnim naprežanjem slijed povećavanja plastičnih deformacija [6].



Slika 3.4. Kruto-idealno plastičan materijal [6]

b) Elastično-idealno plastičan materijal

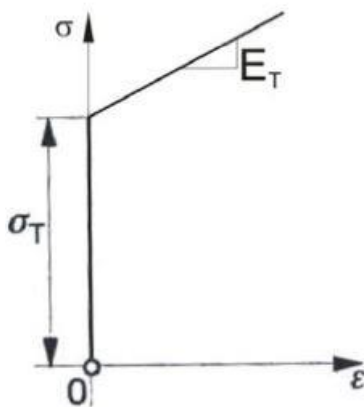
Na slici 3.5. prikazana je definicija elastično-idealno plastičnog materijala koji se koristi pri proračunu konstrukcija načinjenih od materijala s izraženim platoom granice tečenja. Kod predloženog modela opisana je linearna veza naprežanja i deformacija u elastičnom području [7].



Slika 3.5. Elastično-idealno plastičan materijal [6]

c) Kruto linearno-očvršćujući materijal

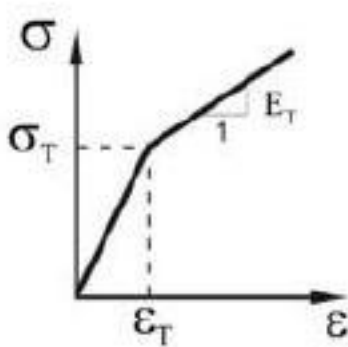
Predložena idealizacija (Slika 3.6.) koristi se kod proračuna konstrukcija kod kojih se promatra samo plastično područje deformacija. Odnos naprezanja i plastičnih deformacija definiran je kao linearna funkcija (tj. tangenti modul elastoplastičnosti), dok je zanemareno ponašanje materijala u elastičnosti.



Slika 3.6. Kruto linearno-očvršćujući materijal [6]

d) Elastično linearno-očvršćujući materijal

Duktilni materijali s neizraženom granicom tečenja σ_T u području malih deformacija opisuju se kako elastično linearno-očvršćujući materijal (Slika 3.7). E_T je tangenti modul elastoplastičnosti koji je puno manji od Youngovog modula elastičnosti.



Slika 3.7. Elastično linearno-očvršćujući materijal [6]

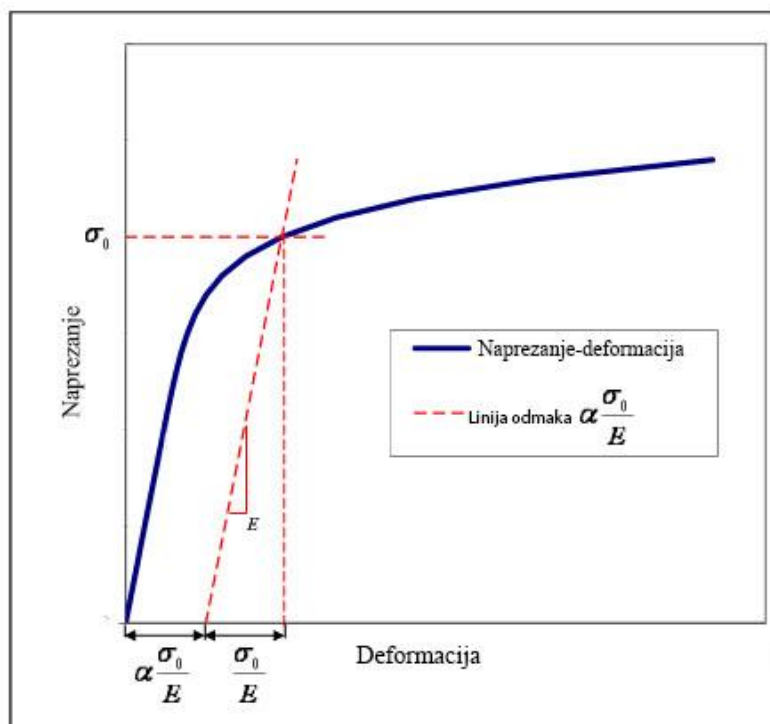
e) Ramberg-Osgoodov materijalni model

Ramberg-Osgood materijalni model opisuje nelinearno ponašanje materijala od granice tečenja do loma. Predloženi konstitutivni zakon prikladan je za opisivanje materijala koji

očvršćuje tijekom plastičnog deformiranja. Ramberg-Osgoodov model (Slika 3.8.) pouzdano opisuje prijelaz iz elastičnog u plastično područje a opisan je izrazom:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n, \quad (3.2)$$

gdje su K i n parametri materijala.



Slika 3.8. Ramberg-Osgoodov materijalni model

3.1.2. Youngov modul E

Youngov modul predstavlja mjeru krutosti materijala i jednak je omjeru vlačnog naprezanja i linijske vlačne deformacije u linearno-elastičnom dijelu σ - ε dijagrama (Slika 3.2.). Modul elastičnosti određen statičkim vlačnim ispitivanjem može se primjeniti i za tlačna naprezanja kod većine materijala a određuje se prema:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{F}{A_0}}{\frac{\Delta L}{L_0}} = \frac{FL_0}{A_0 \Delta L}, \quad (3.3)$$

gdje su:

E - Youngov modul elastičnosti (N/mm²);

F – sila kojom se djeluje na ispitni uzorak (N);

A_0 – početni poprečni presjek ispitnog uzoraka u mirovanju (mm^2);

ΔL – produljuje ispitnog uzoraka (mm);

L_0 – početna duljina ispitnog uzoraka (mm);

σ – naprezanje u ispitnog uzoraka (N/mm^2);

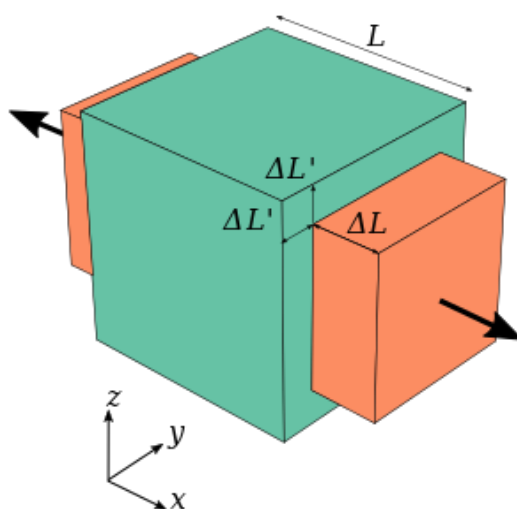
ε – deformacija ispitnog uzoraka (bez dimenzijska veličina tj. $\Delta L/L_0$).

Youngov modul nazvan je prema britanskom znanstveniku Thomasu Young-u, dok je sam pojam matematički izveo Leonard Euler. Prva eksperimentalna istraživanja s ciljem određivanja modula elastičnosti proveo je talijanski znanstvenik Giordano Riccati 1782. godine. [8]

3.1.3. Poissonov koeficijent ν

Poissonov koeficijent definira se kao omjer poprečne i uzdužne deformacije materijala uslijed vlačnog ispitivanja na kidalici (Slika 3.9). Dobio je naziv prema Siméonu Poissonu, francuskom fizičaru i matematičaru [9]. Vrijednosti Poissonovog koeficijent kreće se između vrijednost od 0 i 0,5 a ovise o materijalu. Za slučaj vrijednosti $\nu=0,5$ volumen tijela se tijekom opterećenja ne mijenja. Poissonov koeficijent određuje se pomoću izraza:

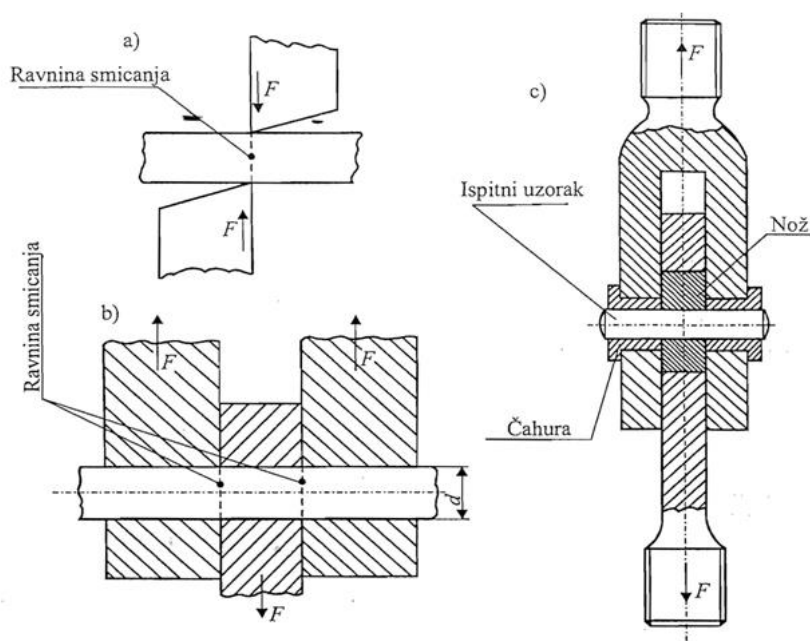
$$\nu = -\frac{\varepsilon_{\text{poprečno}}}{\varepsilon_{\text{uzdužno}}}. \quad (3.4)$$



Slika 3.9. Uzdužna i poprečna kontrakcija materijala uslijed vlačnog opterećenja [9]

3.2. Jednoosno smično ispitivanje

Jednoosna smična ispitivanja provode se prema normi DIN 53294:1982-02. Svrha provođenja smičnih ispitivanja je dobivanje smične čvrstoće, tj. najvećeg smičnog naprezanje kojeg materijal može podnijeti do loma. Ispitivanje se najčešće provodi djelovanjem paralelnih sila suprotnih predznaka koje djeluju u ravnini smicanja i okomito na uzdužnu os ispitnog uzorka (Slika 3.10). Ovakva ispitivanja su posebno važna za određivanje materijalnih karakteristika vijaka, svornjaka i zatika [10] .



Slika 3.10. Eksperimentalni postav za smično ispitivanje vijaka, svornjaka i zatika

Ispitivanje na smik može se provoditi tako da smicanje bude narinuto po jednom presjeku (Slika 3.10.a)) ili dva presjeka (Slika 3.10.b)). Vertikalni pomak traverze kidalice prenosi opterećenje na ispitni uzorak (Slika 3.10.c)). Smična čvrstoća određuje se po jednadžbama za prikazane slučajeve:

a) smicanje po jednom presjeku:

$$R_{m0} = \frac{F_{m0}}{S_0} [\text{MPa}] \quad (3.5)$$

b) smicanje po dva presjeka:

$$R_{m0} = \frac{F_{m0}}{2S_0} [\text{MPa}] \quad (3.6)$$

3.2.1. Modul smicanja G

Coulombov modul smicanja može se prikazati preko omjera smičnog naprezanja τ_{xy} i kutne deformacije γ_{xy} kako prikazuje izraz (3.7).

$$G = \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}} [\text{GPa}]. \quad (3.7)$$

Modul smicanja opisuje kako se materijal ponaša pri smičnim naprezanjima te zajedno s Youngovim modulom elastičnosti E i Poissonovim koeficijentom ν čini tzv. konstante elastičnosti nekog materijala.

Kod ravninskog stanja naprezanja [11] mogu se povezati konstante elastičnosti preko izraza:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (3.8)$$

3.3. Teorije čvrstoće

Ako na neku realnu inženjersku konstrukciju djeluje opterećenje koje izaziva samo jednoosno normalno stanje naprezanja σ_x (aksijalno naprezanje, čisto savijanje) ili posmično naprezanje τ_{xy} (uvijanje, smicanje), dovoljno je maksimalno naprezanje usporediti s kritičnim naprezanjem koje se određuje vlačnim, tlačnim ili smičnim mehaničkim ispitivanjem. Kritično naprezanje krhkih materijala jednako je vlačnoj čvrstoći materijala σ_M , odnosno τ_M . Kritično naprezanje duktilnih materijala jednako je granici tečenja σ_T , odnosno τ_M . Predložena metoda se ne primjenjuje kod dvoosnog, tj. troosnog stanja naprezanja budući da nije moguće neposredno odrediti σ_T i τ_M . Kod višeosnih eksperimentalnih mehaničkih ispitivanja javljaju se različite kombinacije omjera glavnih naprezanja ($\sigma_1: \sigma_2: \sigma_3$). Stoga je potrebno odrediti stvarno naprezanje za pojedini slučaj te usporediti s odgovarajućim kritičnim naprezanjem. Takva ispitivanja bila bi vrlo skupa i dugotrajna, a za mnoge kombinacije tehnički vrlo teško izvediva [11].

Zbog toga se uvode *teorije čvrstoće* koje nastoje predvidjeti pojavu loma, tj. tečenja materijala za dvoosno ili troosno stanje naprezanja na temelju podataka dobivenih pri jednoosnom rastezanju. Postoje više teorija čvrstoće od kojih nijedna nije sveobuhvatna, tj. nije upotrebljiva za sve vrste materijala [11].

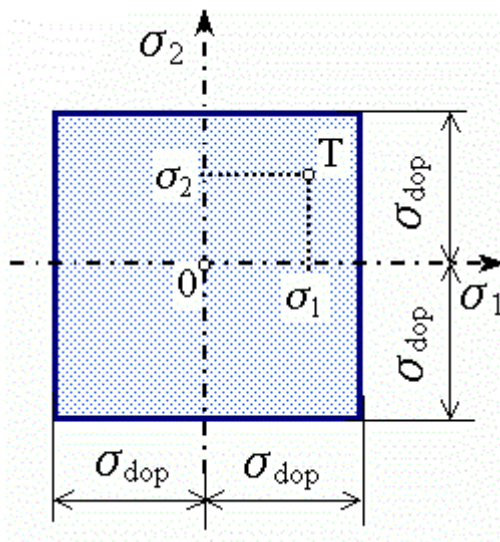
3.3.1. Teorija najvećeg normalnog naprezanja

Prema teoriji najvećeg normalnog naprezanja opasnost od loma nastaje kada najveće normalno naprezanje postigne kritičnu vrijednost. Od tri glavna naprezanja razmatra se samo ono koje je najveće po apsolutnoj vrijednosti, a ostala dva naprezanja se zanemaruju i ne utječu na inicijaciju loma konstrukcije. Uvjet čvrstoće u tom slučaju glasi:

$$\sigma_{ekv} = \sigma_{\max} \leq \sigma_{dop}, \quad (3.9)$$

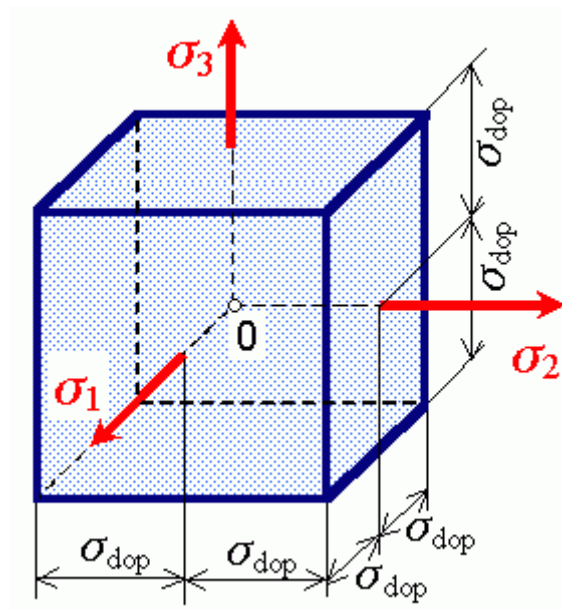
gdje je σ_{ekv} ekvivalentno (efektivno) naprezanje, σ_{\max} je najveća apsolutna vrijednost glavnih naprezanja, a σ_{dop} je dopušteno naprezanje. Dopušteno naprezanje kod krhkih materijala je definirano izrazom $\sigma_{dop} = \sigma_M / S$, a kod duktilnih materijala izrazom $\sigma_{dop} = \sigma_T / S$, gdje je σ_M vlačna čvrstoća materijala, σ_T granica tečenja, a S faktor sigurnosti.

U slučaju dvoosnog stanja naprezanja uvjeti čvrstoće prikazuju se pomoću *krivulja čvrstoće* u koordinatnom sustavu $O\sigma_1\sigma_2$ (Slika 3.11.). Naprezanje u svakoj točki konstrukcije prikazano je jednom točkom T u sustavu $O\sigma_1\sigma_2$. Ako točka T padne unutar kvadrata, nema opasnosti od loma, tj. uvjet čvrstoće je ispunjen. Ako točka T padne na rub kvadrata ili izvan njega uvjet čvrstoće nije ispunjen.



Slika 3.11. Krivulja čvrstoće za teoriju najvećeg normalnog naprezanja

U slučaju troosnog naprezanja uvjet čvrstoće prikazan je *površinom čvrstoće* (Slika 3.12). Prema teoriji najvećeg normalnog naprezanja površina čvrstoće jest površina kocke kojoj bridovi imaju duljinu $2\sigma_{dop}$. Središte kocke je u ishodištu koordinatnog sustava.



Slika 3.12. Površina čvrstoće za teoriju najvećeg normalnog naprezanja

Teorija najvećeg normalnog naprezanja jedna je od prvotno definiranih teorija. Nije se pokazala dobrom osim za krhke materijale u području vlaka [11].

3.3.2. Teorija najveće duljinske deformacije

Po teoriji najveće duljinske deformacije lom nastupa kada jedna od duljinskih deformacije dostigne kritičnu vrijednost. Kriterij čvrstoće u tom slučaju glasi:

$$|\varepsilon|_{\max} \leq \varepsilon_{dop} = \frac{\sigma_{dop}}{E}, \quad (3.10)$$

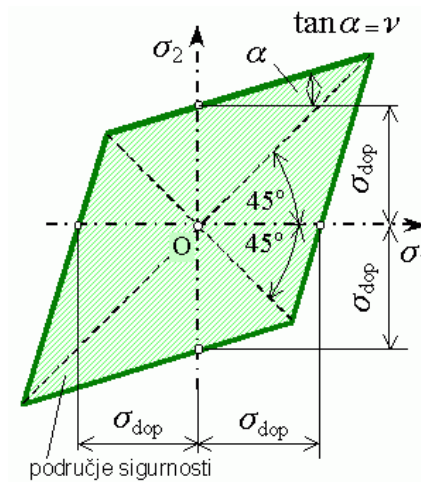
gdje je $|\varepsilon|_{\max}$ najveća apsolutna vrijednost duljinske deformacije. Ako je $|\sigma_1| > |\sigma_3|$, vrijediti će:

$$|\varepsilon|_{\max} \leq \frac{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 - \sigma_3)}{E} = \frac{\sigma_{dop}}{E}; \quad (3.11)$$

tj.

$$\sigma_{ekv} \leq \sigma_1 - \nu(\sigma_2 - \sigma_3) \leq \sigma_{dop}. \quad (3.12)$$

Krivulja čvrstoće prema toj teoriji za dvoosno stanje naprezanja prikazana je na slici 3.13. Ta se teorija također nije pokazala pouzdanom, pa se danas vrlo rijetko koristi [11].



Slika 3.13. Krivulja čvrstoće za teoriju najveće duljinske deformacije

3.3.3. Teorija najvećeg posmičnog naprezanja

Prema teoriji najvećeg posmičnog naprezanja kritično stanje u materijalu nastupa kada najveće posmično naprezanje dostigne kritičnu vrijednost $\tau_{dop} = \sigma_{dop}/2$. Kako je $\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$, uvjet čvrstoće glasi:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \leq \tau_{dop} = \frac{\sigma_{dop}}{2}, \quad (3.13)$$

tj.

$$\sigma_{ekv} = \sigma_1 - \sigma_3 \leq \sigma_{dop}. \quad (3.14)$$

Kod dvoosnog stanja naprezanja jedno glavno naprezanje jednako je nuli. To naprezanje se označava s σ_3 iako tada može biti $\sigma_2 < \sigma_3$, što se ne slaže s dogovorom po kome vrijedi $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Razlikuju se tri slučaja teorije najvećeg posmičnog naprezanja:

- a) *Oba glavna naprezanja veća su od nule.* Tada je $\sigma_3 = 0$, pa izraz (3.13) prelazi u

$$\sigma_{ekv} = \sigma_{max} \leq \sigma_{dop}, \quad (3.15)$$

gdje je $\sigma_{max} = \sigma_1$ ili σ_2 , ovisno o tome koje naprezanje je veće.

- b) *Oba glavna naprezanja manja su od nule.* Tada je uvjet čvrstoće također dan izrazom (3.14); međutim, sada je $\sigma_{max} = \sigma_1$ ili σ_2 ovisno o tome koje naprezanje ima veću apsolutnu vrijednost.
- c) *Glavna naprezanja imaju suprotan predznak.* U tom slučaju naprezanje σ_2 algebarski je najmanje jer se usvaja da je $\sigma_3 = 0$. Izraz (3.14) onda prelazi u:

$$\sigma_{ekv} = \sigma_1 - \sigma_2 \leq \sigma_{dop} \quad \sigma_1 > 0, \quad (3.16)$$

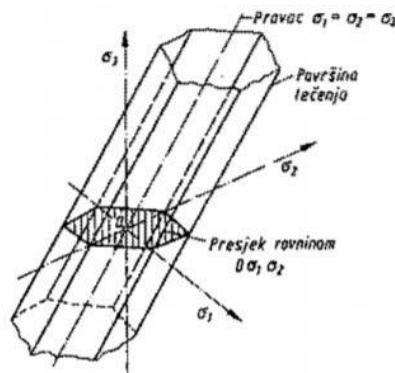
ili

$$\sigma_{ekv} = \sigma_2 - \sigma_1 \leq \sigma_{dop} \quad \sigma_1 < 0. \quad (3.17)$$

Ako se ne pridržava dogovor da vrijedi $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ onda izraz (3.13) treba pisati u obliku:

$$\begin{aligned} |\sigma_1 - \sigma_2| &\leq \sigma_{dop} \\ |\sigma_2 - \sigma_3| &\leq \sigma_{dop} \\ |\sigma_3 - \sigma_1| &\leq \sigma_{dop}. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Izraz (3.18) predstavlja tri para ravnina koje se međusobno križaju tvoreći pravilnu šesterostranu prizmu (Slika 3.14). Ta šesterostrana prizma jednako je nagnuta prema koordinatnim osima σ_1 , σ_2 , σ_3 , tj. pravac $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ je njena os. Šesterostrana prizma je površina tečenja prema teoriji najvećeg posmičnog naprezanja [11].



Slika 3.14. Ploha čvrstoće po teoriji najvećeg posmičnog naprezanja [11]

3.3.4. Teorija najveće distorzijske energije

Po ovoj teoriji opasno stanje materijala nastupa kada gustoća distorzijske energije postigne kritičnu vrijednost. Uvjet čvrstoće tada glasi:

$$U_{od} \leq U_{od\,dop}. \quad (3.19)$$

Gustoća distorzijske energije iznosi:

$$U_{od} = \frac{1+\nu}{6E} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]. \quad (3.20)$$

Kada pri jednoosnom naprezanju σ_1 dostigne vrijednost σ_{dop} , tada dopuštena distorzijska energija iznosi:

$$U_{od\ dop} = \frac{1+\nu}{3E} \sigma_{dop}^2. \quad (3.21)$$

Ako se izrazi (3.20) i (3.21) uvrste u (3.18) dobije se izraz:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \leq 2\sigma_{dop}^2. \quad (3.22)$$

Iz izraza (3.22) slijedi:

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \leq \sigma_{dop}. \quad (3.23)$$

Ova teorija zove se još i HMM po autorima koji su na njoj radili (M.T. Huber, R. von Mises, H. Hencky). U slučaju dvoosnog stanja naprezanja izraz (3.23) prelazi u :

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} \leq \sigma_{dop}. \quad (3.24)$$

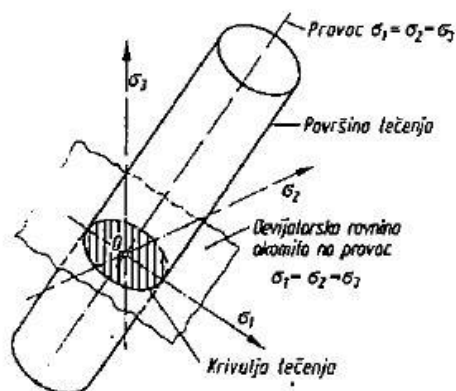
Taj izraz može se napisati i u obliku:

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{dop}}\right)^2 - \frac{\sigma_1}{\sigma_{dop}} \frac{\sigma_2}{\sigma_{dop}} + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{dop}}\right)^2 \leq 1. \quad (3.25)$$

Izraz (3.25) sa znakom jednakosti predstavlja jednadžbu elipse, tj. krivulje loma prema HMM teoriji. Izraz (3.22) je jednadžba valjka polumjera

$$R = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_{dop}, \quad (3.26)$$

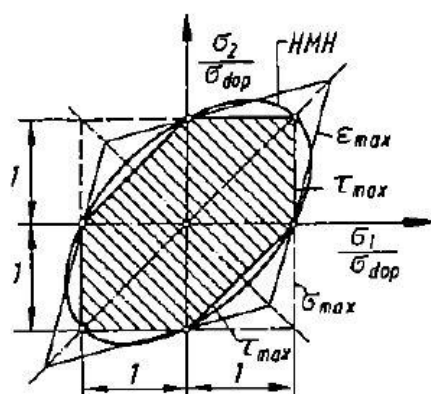
kojemu je os pravac $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Taj pravac čini jednake kutove s koordinatnim osima σ_1 , σ_2 i σ_3 . Taj je valjak (Slika 3.15.) ujedno i površina loma a ravnina koja prolazi kroz ishodište i stoji okomito na pravac $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ zove se *devijatorska ravnina* [11].



Slika 3.15. Ploha čvrstoće po teoriji distorzijske energije [11]

3.3.5. Usporedba teorija čvrstoće

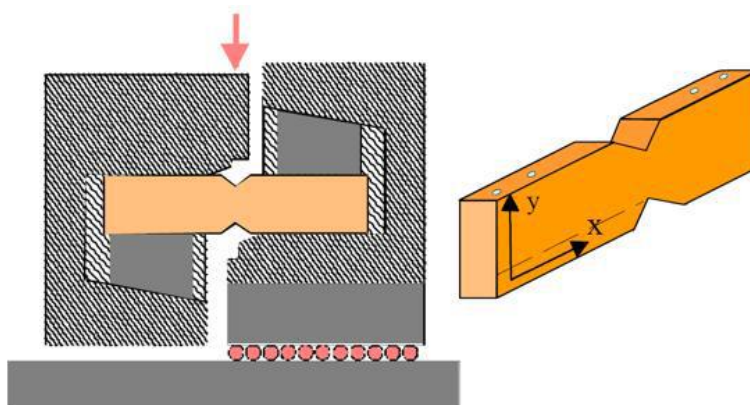
Na slici 3.16. prikazane su krivulje čvrstoće prema svim prethodno navedenim teorijama čvrstoće. Područje sigurnosti po teoriji najvećeg posmičnog naprezanja na slici je iscrtano. Prema slici se vidi kako se područje sigurnosti prema teoriji najvećeg posmičnog naprezanja nalazi unutar područja sigurnosti ostalih teorija, a to znači da teorija najvećeg posmičnog naprezanja za ravninsko naprezanje daje najveću sigurnost pri rješavanju.



Slika 3.16. Usporedba teorija čvrstoća [11]

4. VIŠEOSNI ARCAN PRIHVAT

Jedna od prvih eksperimentalnih metoda za smično mehaničko ispitivanje je *Iosipescu* metoda te je isprva bila razvijena za ispitivanje izotropnih metalnih materijala. Cilj eksperimentalnih ispitivanja korištenjem *Iosipescu* metode je određivanje smične sile u presjeku pravokutnog uzorka uslijed tlačnog jednoosnog opterećenja na predloženi prihvata. Na ispitnom uzorku konstruirana su dva V zareza s cijem postizanja homogenog stanja smicanja u centru uzorka. Osim toga izvedba ispitnog uzorka sa dva V zareza osigurala je inicijaciju loma u promatranom presjeku kako je prikazano na slici 4.1.



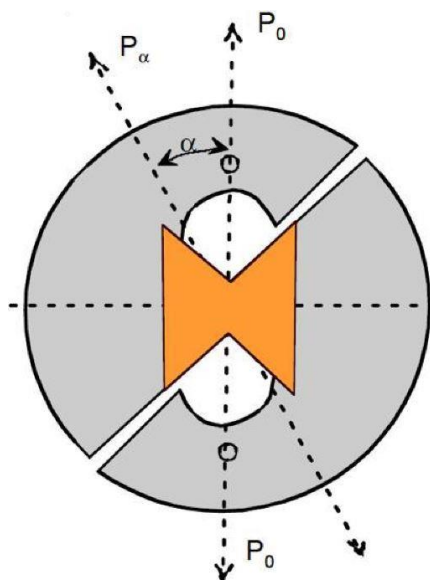
Slika 4.1. Shema Iosipescu metode ispitivanja [12]

Kao rezultat istraživanja određeni su modul smicanja i smična čvrstoća. Za vrijeme ispitivanja ortotropnih materijala zabilježeni su pomaci koji ne odgovaraju teoretskoj raspodjeli (izvan osni pomaci, eng. *out of axis*). Isticano je kako je ova metoda osjetljiva na izvan osne pomake te da su uvjeti opterećenja asimetrični.

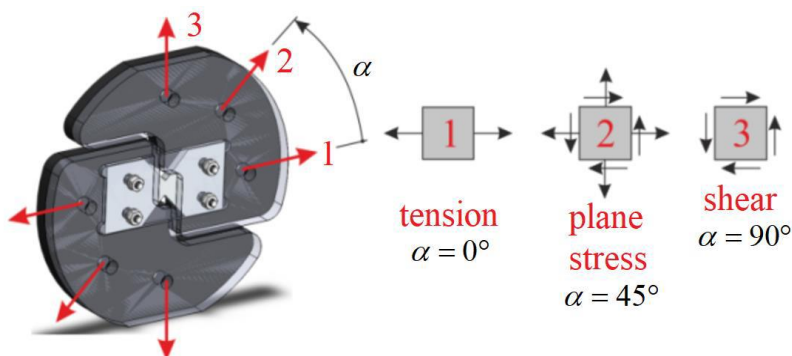
Nekoliko godina nakon razvoja *Iosipescu* metode, predložen je Arcan prihvata za višeosno ravninsko ispitivanje materijala. Arcan prihvata za ispitivanje koristi također ispitni uzorak s dvostrukim V zarezom koji se još naziva i *leptirasti uzorak*. Predloženi ispitni uređaj konstruiran je tako da se uslijed vertikalnog pomaka traverze kidalice izaziva jednostavno ili čisto smično naprezanje. Ovisno o kutu pozicioniranja prihvata, tj. rotacijom prihvata oko osi opterećenja, na jednoosnom ispitnom uređaju moguće je vlačnim i tlačnim opterećenjem postići različita ravninska dvoosna stanja naprezanja.

Veza ispitnog uzorka s Arcan prihvatom ostvarena je pomoću vijaka. Prihvata je razvijen za različite režime opterećenja te omogućuje opterećenje eksperimentalnog uzorka

smicanjem ($\alpha = 0^\circ$), vlačnim opterećenjem ($\alpha = 90^\circ$) (Slika 4.2.), te kombiniranim opterećenjem gdje se dobiva ravninsko stanje naprezanja prema slici 4.3. Kut α može zauzeti položaj od 0° do 90° , ovisno o konstrukciji, te se zbog toga može vrlo jednostavno narinuti različito stanje naprezanja. Glavni nedostatak svih navedenih ispitivanja na smik je da su smična naprezanja prilično nejednolično raspoređena na mjerenom poprečnom presjeku. Na slici 4.3. prikazan je Arcan prihvat sa ispitnim uzorkom spojenim vijčanim vezama.



Slika 4.2. Shematski prikaz Arcan prihvata [12]

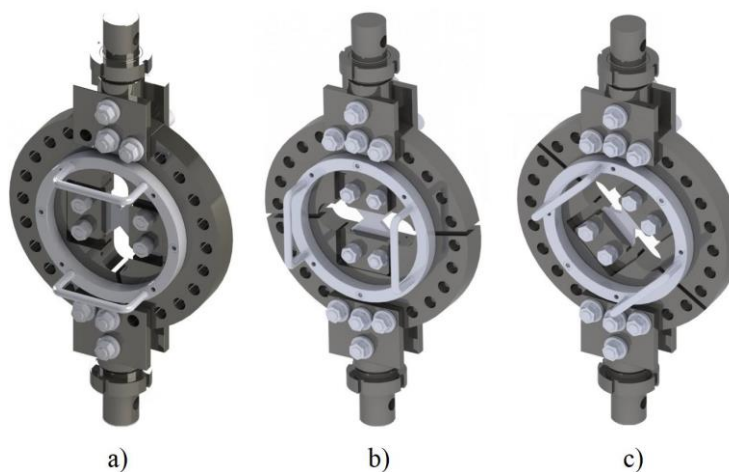


Slika 4.3. Prikaz Arcan prihvata za različita opterećenja [13]

4.1. Izvedba i problemi

Arcan prihvat se pozicionira preko slijeda provrta po obodu prirubnica te se različitim kombinacijama pozicioniranja postižu različiti načini opterećivanja (Slika 4.4.). Pri ispitivanjima koriste se leptiraste epruvete s V zarezom koji je najčešće definiran kutem od $\pm 45^\circ$. Pri vlačnom opterećivanju dolazi do izvan ravninskog savijanja epruvete uslijed nesimetričnosti prirubnica te načinom spajanja epruvete za prirubnice. Adapter koji pritiskom

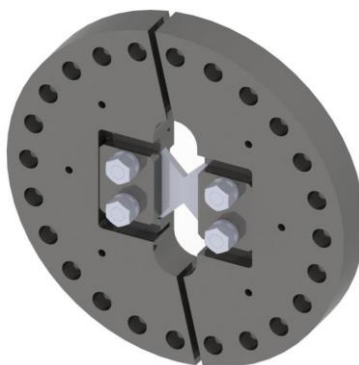
djeluje na ispitni uzorak za prirubnice je spojen vijčanom vezom na način da te se deformira različito od prirubnica budući da nisu kruto vezani.



Slika 4.4. Tri karakteristična slučaja opterećenja: a) vlak, b) smik, c) kombinacija [14]

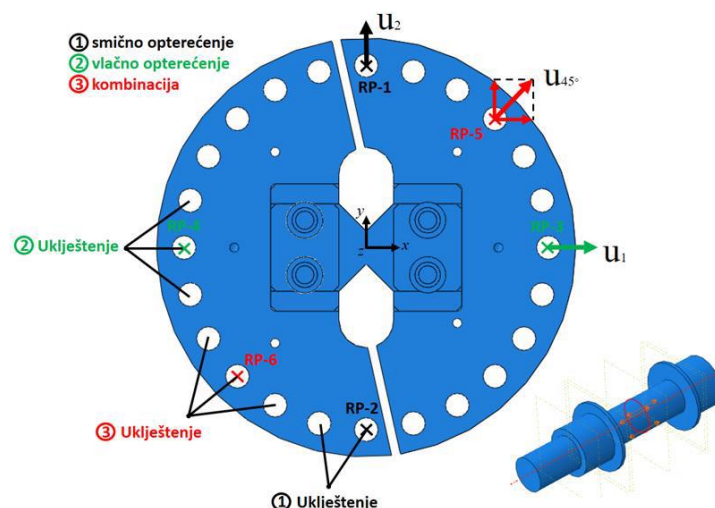
4.2. Rezultati numeričke analize

Za numerički proračun analizu koristio se pojednostavljeni proračunski model Arcan prihvata (Slika 4.5.) koji ne sadrži adaptore i okvir za rotaciju prihvata jer ne utječu na analizu.



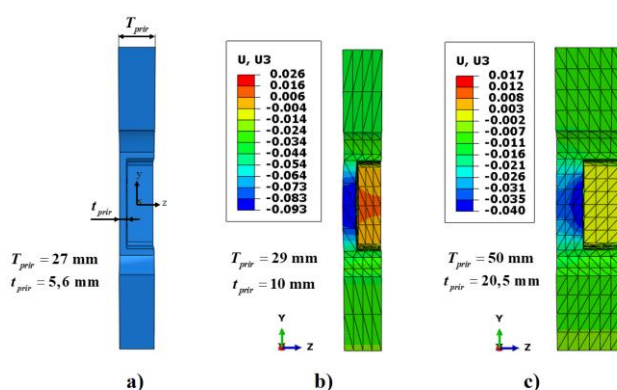
Slika 4.5. Proračunski model [14]

Cijeli prihvata je bio konstruiran u CAD programu te je bio unesen u FE program *Abaqus*. Svim komponentama sklopa, osim leptirastog uzorka, zadani su modul elastičnosti $E=200$ GPa te Poissonov koeficijent $\nu=0,3$. Rubni uvjeti prikazani su na slici 4.6. gdje se može vidjeti kako je lijeva prirubnica ukliještena. Korišteni su tetraedarski elementi drugog reda C3D10 zbog vrlo složene geometrije proračunskog modela.



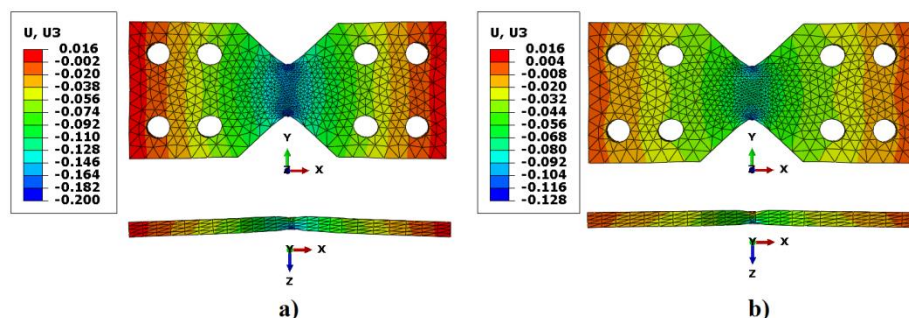
Slika 4.6. Prikaz opterećenja i rubnih uvjeta proračunskog modela [14]

Konstruirani proračunski model sadržavao je leptirasti ispitni uzorak debljine 5 mm budući je za to bio najkonzervativniji slučaj za koji je bilo potrebno proračunati predloženi prihvata. Prilikom numeričkih analiza uvidjelo se da su potrebne konstrukcijske promjene samog prihvata jer je došlo do negativnih efekata poput izvan ravninskog savijanja tijekom vlačnog ispitivanja. Zabilježeno je i preveliko klizanje između leptirastog uzorka i prihvata. Radi poboljšanja raspodjele kontaktnog pritiska povećan je broj vijaka na 4 sa svake strane. Velik problem je predstavljalo izvan ravninsko savijanje uslijed vlačnog opterećenja te se provjerilo kako pojedini parametri i konstrukcijsko rješenje utječu na savijanje uzorka. Zadebljanjem prirubnice te zadebljanjem rebra prirubnice smanjio se pomak U_3 tj pomak u osi z . Važno naglasiti da su iznosi pomaka procijenjeni kod $\approx 20\%$ deformacija (Slika 4.7).



Slika 4.7. Utjecaj pomaka U_3 ovisno o debljini prirubnice pri deformaciji $\approx 20\%$: a) početna geometrija, b) $T_{\text{prirubnice}} = 29$ mm, c) $T_{\text{prirubnice}} = 50$ mm [14]

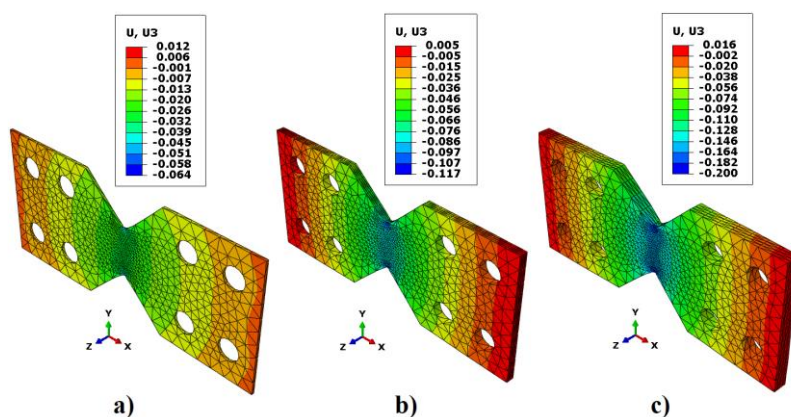
Zadebljanjem prirubnice na 50 mm može se vidjeti kako se pomak u smjeru osi z tj U_3 približio nuli. Na slici 4.7. b) iznosio je -0,093 mm, a na c) iznosio je -0,04 mm.



Slika 4.8. Savijanje leptiraste epruvete pri deformaciji $\approx 20\%$ ovisno o debljini prirubnice:

a) $T_{prir} = 29$ mm, b) $T_{prir} = 50$ mm

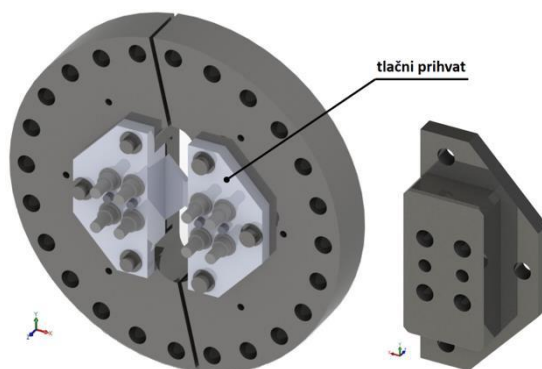
Na slici 4.8. prikazano je izvan ravninsko savijanje u ovisnosti o debljini prirubnica. Pri debljini od 29 mm pomak u smjeru osi z iznosio je -0,2 mm, a povećanjem debljine prirubnice iznos pomaka smanjio se na -0,128 mm. Na slici 4.9. prikazan je utjecaj debljine uzorka pri deformaciji $\approx 20\%$ na savijanje. Deblji uzorci su krući te je potrebna veća sila kako bi došlo do istog iznosa deformacije. Iz prikazanih slika se može vidjeti kako je pomak u smjeru osi z veći kod debljih uzoraka te iznosi -0,2 mm.



Slika 4.9. Utjecaj debljine uzorka na savijanje pri deformaciji $\approx 20\%$: a) $T_{uzorka} = 1$ mm, b) $T_{uzorka} = 3$ mm, c) $T_{uzorka} = 5$ mm [14]

Pojedini vijci su uslijed izvan ravninskog savijanja opterećeni na smik. Zbog toga dodana su dva zatika sa svake strane ispitnog uzorka. Pretpostavka je kako će zatici preuzeti smična opterećenja koja se većinom javljaju kod čistog vlačnog ispitivanja. Zatici nemaju toliko utjecaj na raspodjelu pomaka te na raspodjelu naprezanja u epruveti. Uzrok svih uočenih nedostataka predloženog konstrukcijskog rješenja prihvata leži u nesimetričnosti desne prirubnice te puno manjoj krutosti njene prednje strane. Uz to, prijenos pomaka, tj. opterećenja prirubnice na uzorak vrši se preko njene stražnje strane, odnosno vijaka. Kako bi

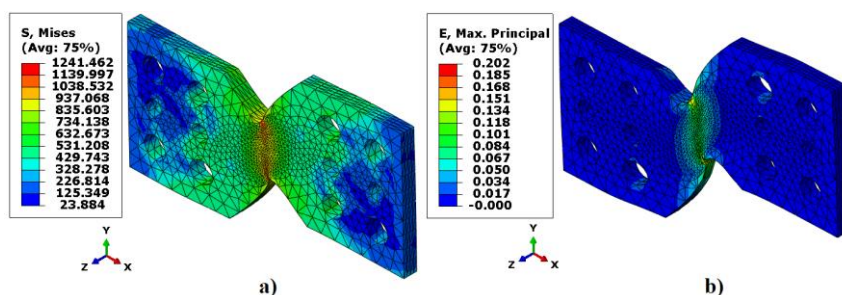
se smanjio utjecaj izvan ravninskog savijanja te izbjeglo smično opterećenje vijaka a ujedno i približilo idealiziranom stanju naprezanja unaprijeđena je konstrukcija prvobitnog koncepta. S ciljem dodatnog smanjenja izvan ravninskog savijanja i ukrućivanja cijelog prihvata povećana je debljina prirubnice sa 27 mm na 35 mm te je promjenjen prihvata adaptera za prirubnicu i epruvetu (Slika 4.10.).



Slika 4.10. Konačni proračunski model i prikaz tlačnog prihvata [14]

4.2.1. Smično opterećenje

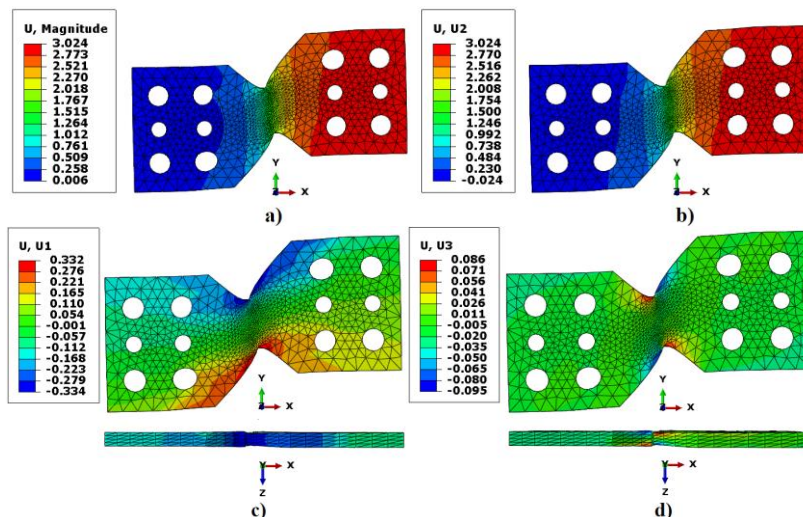
Na slikama 4.11., 4.12., 4.13., prikazani su rezultati numeričke analize smičnog opterećenja kao i raspodjela pomaka cjelokupnog proračunskog modela. Svi prikazani rezultati su za deformaciju uzorka od $\approx 20\%$ [14]. Najveće ekvivalentno naprezanje je u sredini epruvete gdje je koncentracija naprezanja te iznosi 1241,462 MPa (Slika 4.11. a)). Deformacije su koncentrirane u sredini epruvete te najveći očitani iznos deformacije je 0,202% (Slika 4.11. b)).



Slika 4.11. Prikaz: a) naprezanje prema von Misesu, b) deformacija, MPa [14]

Na slici 4.12. prikazana je raspodjela pomaka na epruveti. Najveći ukupni pomak na desnom kraju epruvete koja je povezana s desnom pomičnom prirubnicom iznosi 3,024 mm (Slika 4.12. a)). U smjeru osi y zabilježen je najveći pomak na desnom kraju epruvete (Slika 4.12. b)). U širem području oko V zarezaja pojavljuju se pomaci u smjeru osi x. (Slika 4.12. c)).

Najveći pozitivni pomak u smjeru osi x iznosi 0,332 mm, a negativni iznosi -0,334 mm (Slika 4.12. c)). Mogu se uočiti i pomaci u smjeru osi z oko samih vrhova V zareza te najveća izmjerena vrijednost pomaka u pozitivnom smjeru osi z iznosi 0,086 mm, a u negativnom smjeru iznosi -0,092 mm (Slika 4.12. d)).

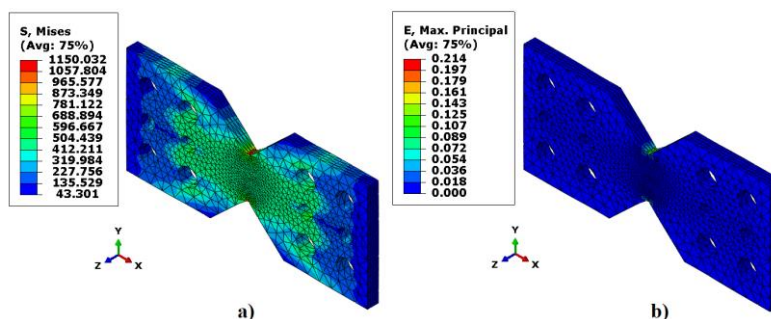


Slika 4.12. Raspodjela pomaka: a) ukupni pomak, b) pomak u smjeru osi y , c) pomak u smjeru osi x , d) pomak u smjeru osi z [14]

Na slici 4.12. nije zabilježeno izvan ravninsko savijanje leptirastog uzorka već je došlo do gužvanja materijala pri velikom smičnom opterećenju u području korijena zareza.

4.2.2. Vlačno opterećenje

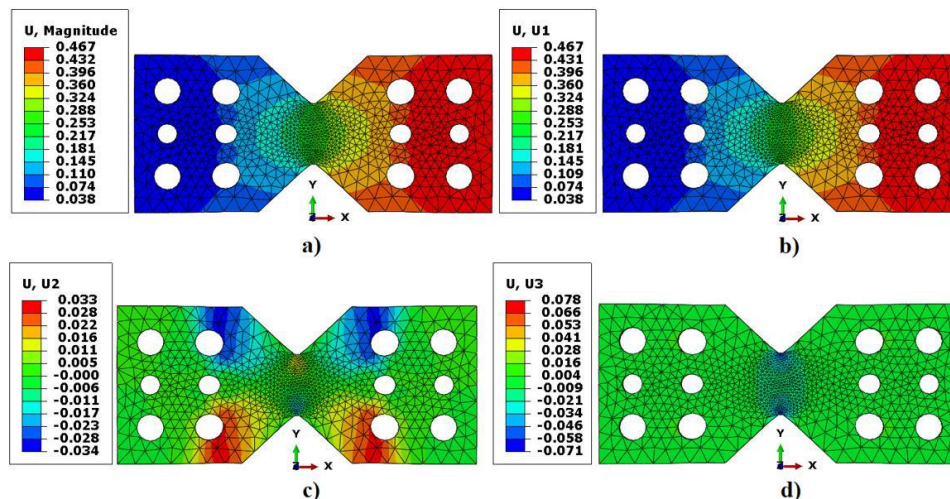
Na slikama 4.13., 4.14., 4.15. prikazani su rezultati numeričke analize za slučaj vlačnog opterećivanja prihvata. Svi prikazani rezultati su za deformaciju uzorka od $\approx 20\%$ [14]. Ekvivalentno naprezanje koje je koncentrirano u korijenu V zareza iznosi 1150,032 MPa (Slika 4.13. a)). Najveće deformacije se također nalaze u korijenu V zareza te iznose 0,214 mm (Slika 4.13. b)).



Slika 4.13. Prikaz: a) naprezanje prema von Misesu, b) deformacija [14]

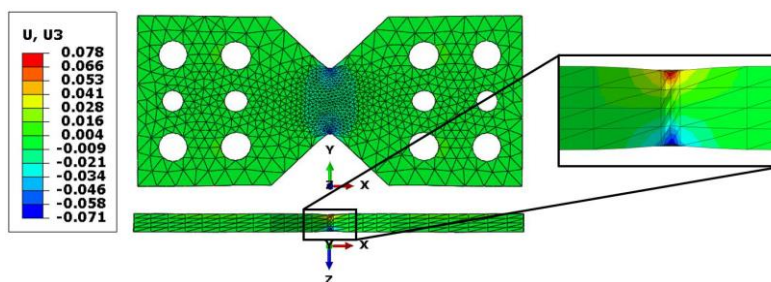
Na slici 4.14. prikazani su proračunati pomaci na cijelom ispitnom uzorku. Najveći ukupni pomak iznosi 0,467 mm (Slika 4.14. a)) te je on jednak najvećem pomaku u smjeru osi

x (Slika 4.14. b)). Oko V zarezra pojavljuju su pomaci u smjeru osi y te se može uočiti kako se poprečni presjek na tim mjestima sužava uslijed vlačnog opterećenja (Slika 4.14. c)). Pomaci u pozitivnom smjeru iznose 0,033 mm, a u negativnom smjeru -0,034 mm (Slika 4.14. c)). U samim vrhovima V zarezra javljaju se pomaci u smjeru osi z (Slika 4.14. d)).



Slika 4.14. Raspodjela pomaka: a) ukupni pomak, b) pomak u smjeru osi x , c) pomak u smjeru osi y , d) pomak u smjeru osi z [14]

Na slici 4.15 prikazana je detaljnija raspodjela pomaka u smjeru osi z (U_3) te je vidljivo da je prvobitno izvan ravninsko savijanje uslijed vlačnog ispitivanja minimizirano. Pri 20% deformacije pomak u smjeru osi z iznosi 0,078 mm što je rezultat stanjivanja materijala.

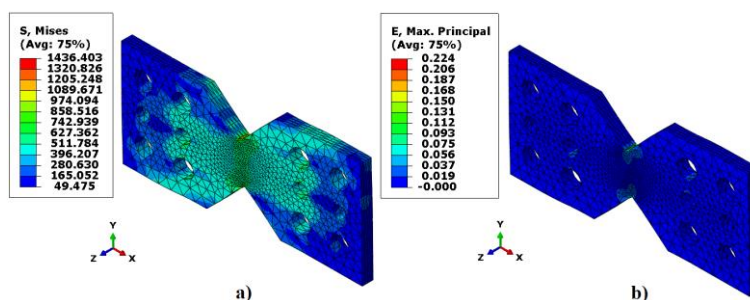


Slika 4.15. Prikaz pomaka u smjeru osi z za vlačno ispitivanje [14]

4.2.3. Kombinacija smičnog i vlačnog opterećenja pod 45°

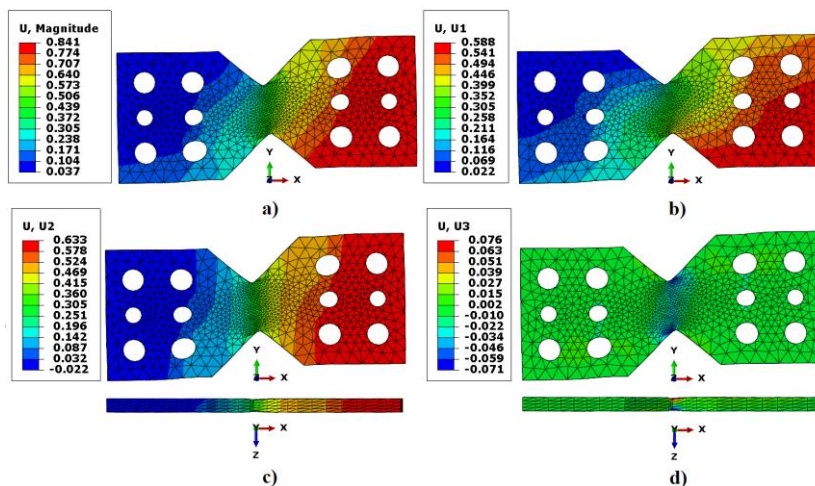
Ovaj slučaj opterećivanja je kombinacija prethodna dva slučaja opterećivanja. Ispitni uzorak zakrenut je za 45° u odnosu na čisto vlačno i čisto smično opterećenje. Na sljedećim slikama prikazana je raspodjela pomaka i naprezanja na leptirastom uzorku kao i raspodjela pomaka cjelokupnog proračunskog modela. Ekvivalentno naprezanje prema von Misesu

koncentrirano je u korijenu V zareza te iznosi 146,403 MPa (Slika 4.16. a)). Najveća deformacija je zabilježena u korijenu V zareza i iznosi 0,224% (Slika 4.16. b)).



Slika 4.16. Prikaz: a) naprezanje prema von Misesu, b) deformacija [14]

Na slici 4.17. prikazani su svi pomaci na epruveti. Na desnom kraju epruvete zabilježen je najveći pomak koji iznosi 0,841 mm (Slika 4.17. a)). Najveći pomaci u smjeru osi x i osi y zabilježeni su na desnom kraju epruvete. Najveći pomak u smjeru osi x koji iznosi 0,588 mm (Slika 4.17. b)) manji je od najvećeg pomaka u smjeru osi y koji iznosi 0,633 mm (Slika 4.17. c)). Kao i kod ispitivanja na vlačno opterećenje, pomaci u smjeru osi z , koji se nalaze u vrhovima V zareza, posljedica su stanjivanja materijala (Slika 4.17. d)). U pozitivnom smjeru pomak u smjeru osi z iznosi 0,076 mm, a u negativnom -0,071 mm (Slika 4.17. d)).

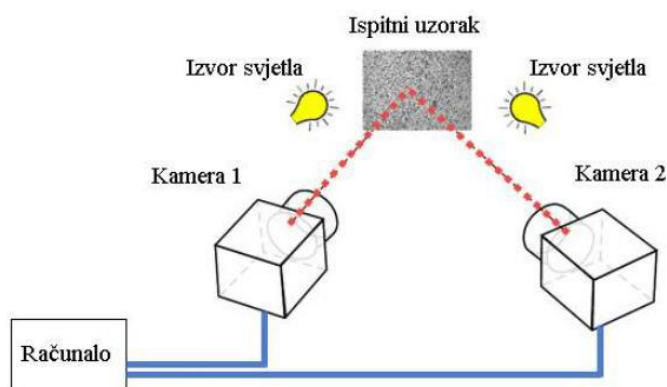


Slika 4.17. Raspodjela pomaka: a) ukupni pomak, b) pomak u smjeru osi x , c) pomak u smjeru osi y , d) pomak u smjeru osi z [14]

Rezultati dobiveni numeričkom analizom modificiranog Arcan prihvata pokazali su kako je smanjen utjecaj izvan ravninskog savijanja. Osim toga, dobiveni rezultati polja pomaka, deformacija, i naprazanja odgovaraju idealnom ravninskom stanju opterećenja kod predloženih opterećenja čime se može zaključiti kako je minimiziran utjecaj naprezanja uslijed savijanja leptirastog ispitnog uzorka.

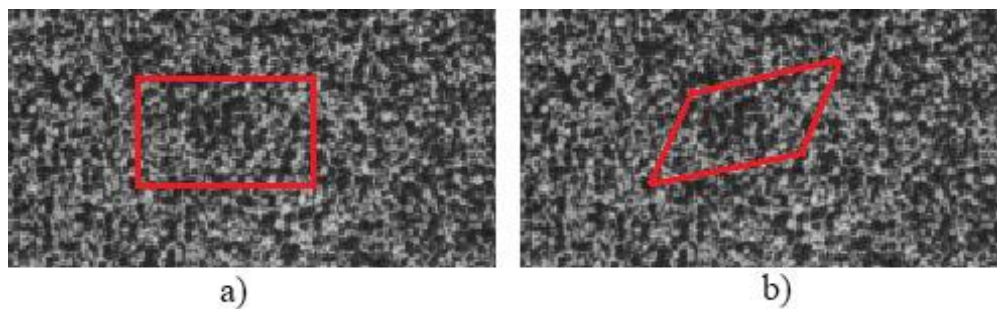
5. METODA KORELACIJE DIGITALNIH SLIKA

Metoda korelacije digitalnih slika (eng. *Digital image correlation* (DIC)) je optička metoda nerazornog mjerenja pomaka i/ili deformacija 2D površina ili 3D objekata koja koristi uslikanu digitalnu sliku za mjerenje cijelog polja pomaka. Predložena metoda može se primijeniti na svim materijalima te različitim mehaničkim ispitivanjima deformabilnih i krutih tijela uslijed jednostavnih i/ili kompleksnih programa opterećenja. Mjerenja se mogu provoditi na nano, mikro, mezo i macro razini (od 10^{-9} do 10^2 m). Potrebni elementi za primjenu ove metode su kamera, izvor svjetla te odgovarajući korelacijski algoritam koji se primjenjuje na nizu zabilježenih digitalnih slika (Slika 5.1.).



Slika 5.1. Shematski prikaz DIC mjerenja s dvije kamere primjenom korelacije digitalne slike [15]

Metoda korelacije digitalnih slika uspoređuje digitalne slike ispitnog uzorka u različitim stadijima opterećivanja, a prati kako se mijenja položaj točaka na površini ispitnog uzorka uspoređivanjem položaja mjernih točaka u deformiranom i nedeformiranom stanju. Prva slika koja se uslika je referentna i označava nedeformirano stanje uzorka. Digitalne slike diskretiziraju se manjim zonama interesa tj. *fasetama*, vidi sliku 5.2.

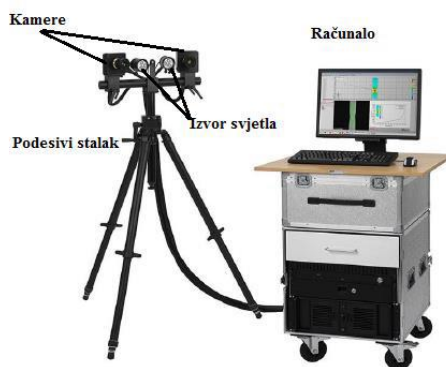


Slika 5.2. Primjer stohastičkog rastera i crveno označena provokutna faseta u: a) referentnoj konfiguraciji, b) deformiranoj konfiguraciji

Svaka faseta sadrži u svom središtu mjernu točku (eng. *measuring point*). Fasete su obično pravokutnog ili kvadratičnog oblika, a međusobno se razlikuju jedinstvenom raspodjelom intenziteta sive boje. Kako bi se mogla primjeniti predložena metoda potrebno je nanošenje stohastičkog uzorka (rastera) na površinu mjernog objekta.

5.1. Optički sustav Aramis

Aramis je beskontaktni optički 3D mjerni sustav koji analizira, izračunava i dokumentira pomake i deformacije [16]. Temelji se na lokalnom pristupu korelacije digitalne slike, a služi za mjerenje trodimenzionalne i dvodimenzionalne promjene oblika i raspodjele deformacija na površini statički ili dinamički opterećenih deformiranih mjernih objekata. Primjenjuje se u analizi čvrstoće konstrukcija, određivanju svojstava materijala, verifikaciji i usavršavanju numeričkih proračuna, itd. Elementi sustava prikazani su na slici 5.3.



Slika 5.3. Optički mjerni sustav Aramis [16]

Sustav se sastoji od podesivnog stalka, dvije kamere, izvora svjetla te računala za obradu dobivenih digitalnih slika. Ako se pri mjerenju koristi samo jedna kamera onda je riječ o 2D mjerenju dok se kod 3D ili stereo mjerenja koriste dvije kamere. Preko softverskog sustava dostupne su funkcije mjerenja, procjene, prikaza te ispisa rezultata. *Aramis* koristi operativni sustav *Linux* koji je u kombinaciji s posebno razvijenim softwareom *Aramis* jedan od najprodavanijih komercijalnih paketa za mjerenje cijelog polja pomaka. Postupak mjerenja sustavom može se podijeliti na sljedeće korake:

1. Priprema mjernog objekta,
2. Nanošenje stohastičkog uzorka na površinu mjernog objekta,
3. Podešavanja i kalibracija sustava za željeni mjerni volumen,
4. Provedba snimanja mjernog objekta,
5. Pohrana i obrada digitalnih slika.

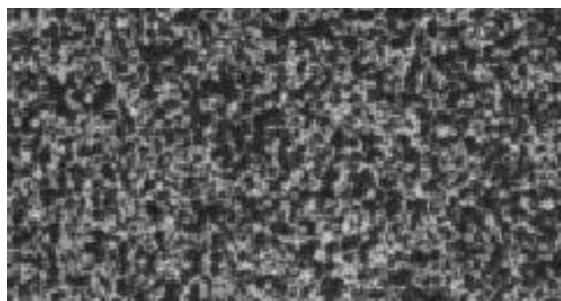
5.1.1. Priprema mjernog objekta

Kako bi rezultati mjerenja bili što točniji potrebno je površinu mjernog uzorka pravilno pripremiti te zadovoljiti sljedeće uvjete:

- Površina mjernog objekta mora imati uzorak koji senzor prepoznaje da bi mogao izdvojiti fasete,
- Karakteristički uzorak površina mora biti u stanju pratiti deformacije uzorka,
- Površina uzorka mora biti glatka,
- Obojani uzorak na objektu mora imati zadovoljavajući kontrast,
- Površina uzorka ne smije biti sjajna zbog refleksije koja uzrokuje loš kontrast i prekomjernu svijetlinu u kamerama.

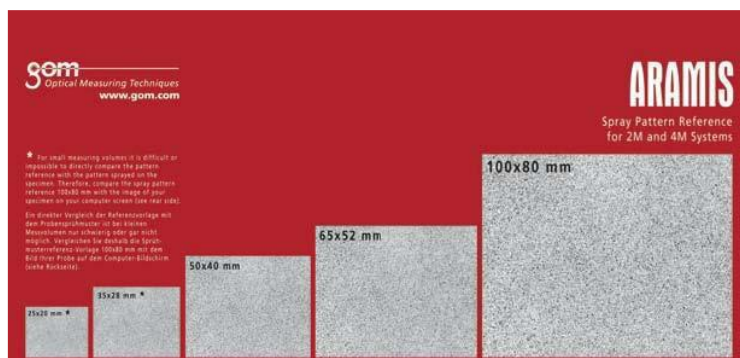
5.1.2. Nanošenje stohastičkog uzorka na površinu mjernog objekta

Kako bi se mogao nanijeti raster na površnu, uzorci se prvo trebaju očistiti od nečistoća i ulja. Tek nakon čišćenja na uzorke se nanosi raster. Na slici 5.4. prikazan je rasterski uzorak.



Slika 5.4. Stohastički uzorak s primjerom dobrog kontrasta

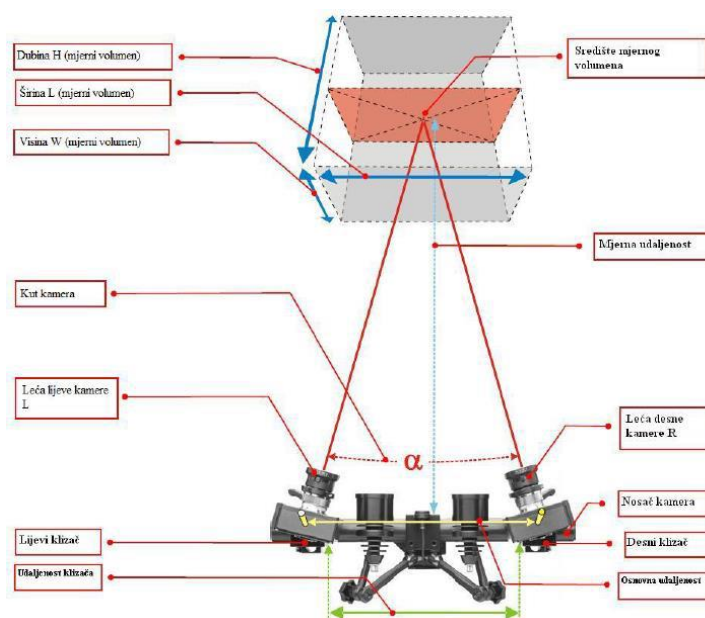
Najčešće se, pri nanošenju boje prvo nanosi nereflektirajuća bijela boja. Nakon sušenja bijele mat boje nanosi se crna boja koja rezultira crnim točkicama na bijeloj podlozi. Postupak se može odraditi klasičnim sprejevima. Slika 5.5. prikazuje primjere stohastičkih uzoraka tvrtke GOM za različite mjerne volumene.



Slika 5.5. Primjeri stohastičkih uzoraka za različite mjerne volumene [17]

5.1.3. Podešavanje i kalibracija sustava

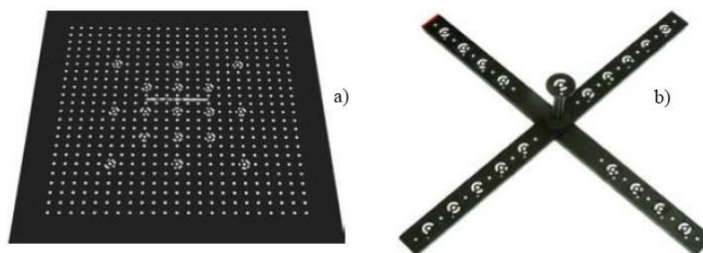
Kako bi se moglo započeti ispitivanje potrebno je podesiti cijeli sustav. Postupak se sastoji od podešavanja udaljenosti od objekta, osvjetljenje objekta te je potrebno provesti kalibraciju senzora i kamera. Kalibracija služi kako bi se podesili unutarnji i vanjski parametri kamere, te ujedno poništile sve nepravilnosti u kameri koje mogu biti uzrokovane okolinom u kojoj se provodi mjerenje. Nepravilnosti mogu uzrokovati neprikladan prostor ispitivanja ili greške na samim kamerama (nečiste leće, polarizacijska stakla ili različita oštećenja na lećama) [15]. Svi dijelovi sustava i parametri koji se kalibriraju prikazani su na slici 5.6.



Slika 5.6. Ilustracija sustava Aramis s potrebnim parametrima za podešavanje [15]

Potrebni parametri koje je potrebno podesiti prije svakog mjerenja su: mjerni volumen, otvor blende s kojim se korigira razina osvjetljenosti na slici, fokus kamera koji podešava oštrinu slike te polarizacijska stakla koja se nalaze na kamerama i izvorima svjetla.

Polarizacijska stakla omogućuju smanjenje neželjene refleksije s površine objekta, kut kamera, udaljenost kamera. Kako bi se postigla oštra slika tijekom mjerenja i kalibracije važno je postaviti sustav na odgovarajuću udaljenost od mjernog objekta. Ponovna kalibracija sustava potrebna je samo u slučajevima kada su na prethodnu kalibraciju utjecali vanjski uvjeti poput vibracija. Sve parametre odredio je proizvođač te s obzirom na te podatke je moguća ispravna kalibracija. Kalibracija se provodi pomoću odgovarajućih kalibracijskih objekata prikazanih na slici 5.7.



Slika 5.7. Kalibracijski uređaji [15]

Postoje dvije vrste kalibracijskih objekata – kalibracijske ploče za male mjerne volumene (Slika 5.7 a)) i kalibracijski štapovi za veće mjerne volumene (Slika 5.7 b)). Na kalibracijskim objektima nalaze se referentne točke čije su međusobne udaljenosti poznate. Postupak kalibracije unaprijed je određen u softveru sustava, tako da se s unaprijed određenim parametrima sustava snima kalibracijski objekt. Očekivana pogreška kalibracije kod ispravne kalibracije može iznositi od 0,01 do 0,04 piksela. U slučaju loše izvedene kalibracije sustava nastaje dekalibracija sustava, što rezultira velikim devijacijama faseta te posljedično većoj mjernoj nesigurnosti.

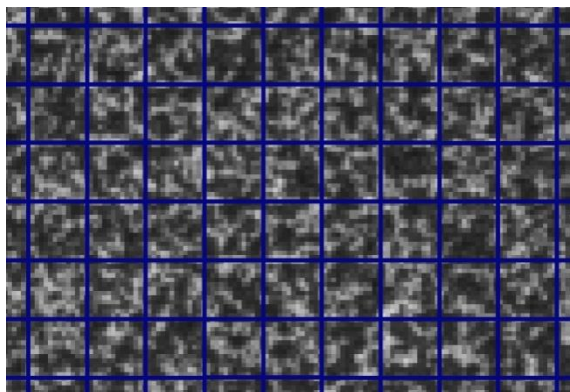
5.1.4. Provedba snimanja mjernog objekta

Nakon uspješne i točne kalibracije sustava, kamere se mogu postaviti pred mjerni uzorak. Prije početka snimanja dodatno se po potrebi namještavaju izvori svjetla te se podešavaju i parametri kamere, brzina snimanja (broj slika u sekundi (fps)) te vrijeme ekspozicije.

5.1.5. Pohrana i obrada digitalnih slika

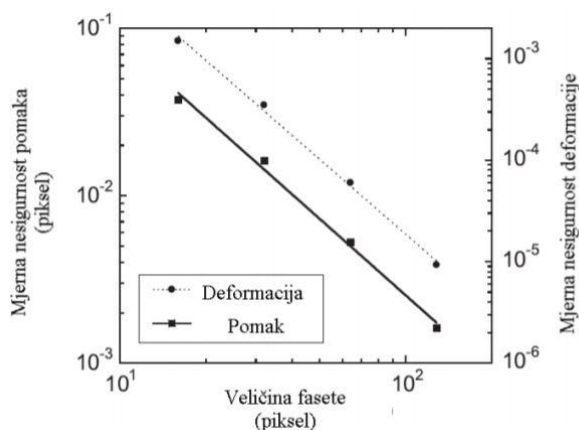
Nakon snimanja dobivene digitalne slike pohranjuju se u memoriju sustava. S obzirom da sustav koristi lokalni pristup metode korelacije digitalne slike, digitalne slike se

diskretiziraju fasetama. Veličina i korak fasete definiraju se softverski pri obradi digitalnih slika, a primjer fasete prikazan je na slici 5.8.



Slika 5.8. Faseta veličine 15x15 s 2 preklapajuća piksela

Na slici 5.8. prikazana je faseta dimenzija 15x15 piksela s korakom od 13 piksela tj. s dva piksela preklapanja. Veličina fasete direktno utječe na mjernu nesigurnost izmjerenih pomaka i deformacija. Povećanjem veličine fasete smanjuje se mjerna nesigurnost, ali izračun postaje zahtjevniji (Slika 5.9).

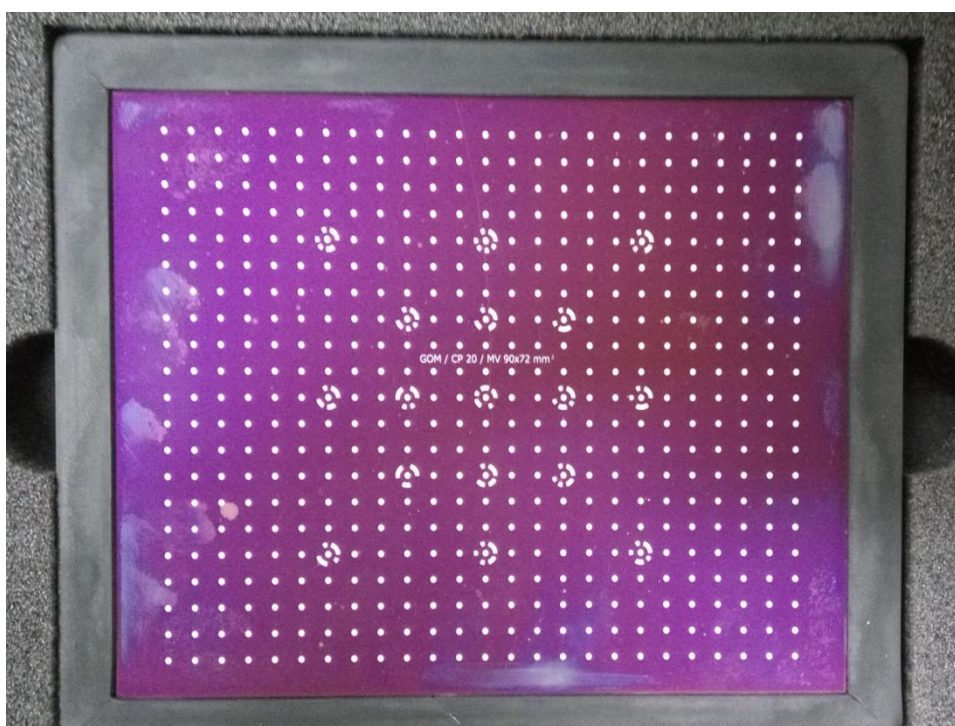


Slika 5.9. Ovisnost mjerne nesigurnosti pomaka i deformacija o veličini fasete [18]

Povećanjem veličine fasete nemoguće je odrediti pomake i deformacije u zonama koje su manje od veličine fasete. Ako se veličina fasete smanji onda se eliminiraju navedeni nedostaci, ali to uzrokuje povećanje mjerne nesigurnosti. Ukoliko se poveća korak fasete smanjuje se gustoća mjernih točaka što bi rezultiralo kraćim trajanjem izračuna pomaka i deformacija. Smanjenjem koraka fasete povećava se broj mjernih točaka te s time račun postaje zahtjevniji budući da je potrebno analizirati više mjernih točaka. Koordinate fasete određuju se iz kutnih točaka i mjernih točaka u središtima faseta. Lijeva i desna kamera promatraju iste fasete te fotogrametrijskim postupcima može se dobiti zajednička 3D koordinata promatrane fasete.

6. PROVEDBA EKSPERIMENTA

U ovom poglavlju opisan je postupak provođenja ispitivanja. Za provedbu mjerenja eksperimenata korišten je sustav *Aramis 4M* opremljen dvjema digitalnim CCD kamerama Dalsa Falcon 4M60 s frekvencijom od 60 do 480 Hz i rezolucijom 2358×1728 piksela. Prije samih eksperimenata provedena je kalibracija koristeći podatke za odabrani mjerni volumen veličine 100×75 mm. Za navedeni volumen koristi se kalibracijski objekt veličine 90×72 mm (Slika 6.1). Nakon kalibracije utvrđeno je fizikalna veličina jednog piksela koja odgovara 0,045 mm.

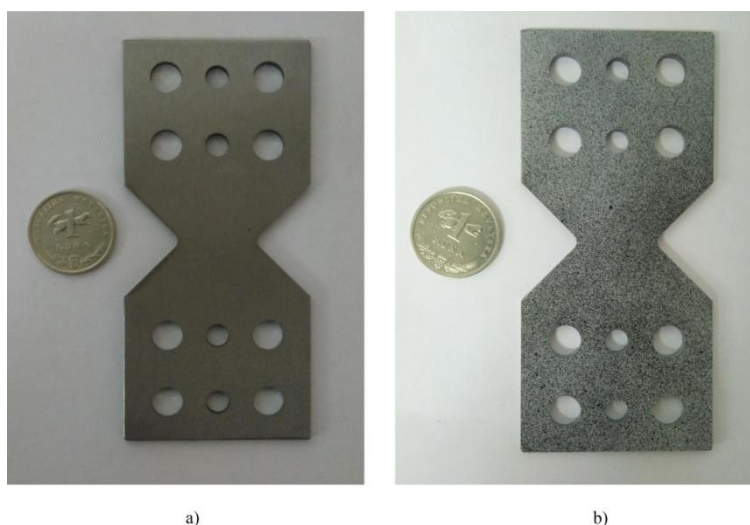


Slika 6.1. Odabrani mjerni objekt veličine 90×72 mm

Za kalibriranje potrebno je bilo ispravno podesiti sljedeće parametre:

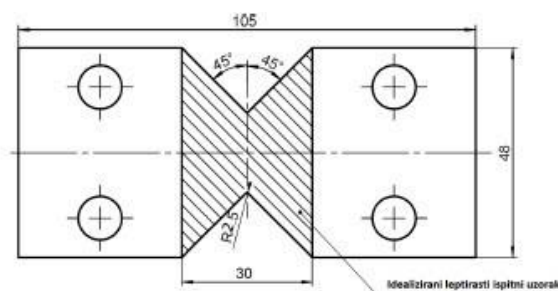
- Objektiv 50 mm,
- Udaljenost kamera 150 mm,
- Udaljenost od objekta 400 mm,
- Kut kamere 25° ,
- Kalibracijski objekt veličine 90×72 mm.

Nakon uspješno provedene kalibracije slijedi priprema ispitnih uzoraka (Slika 6.2. a)).



Slika 6.2. Ispitni uzorak: a) bez rastera, b) s rasterom

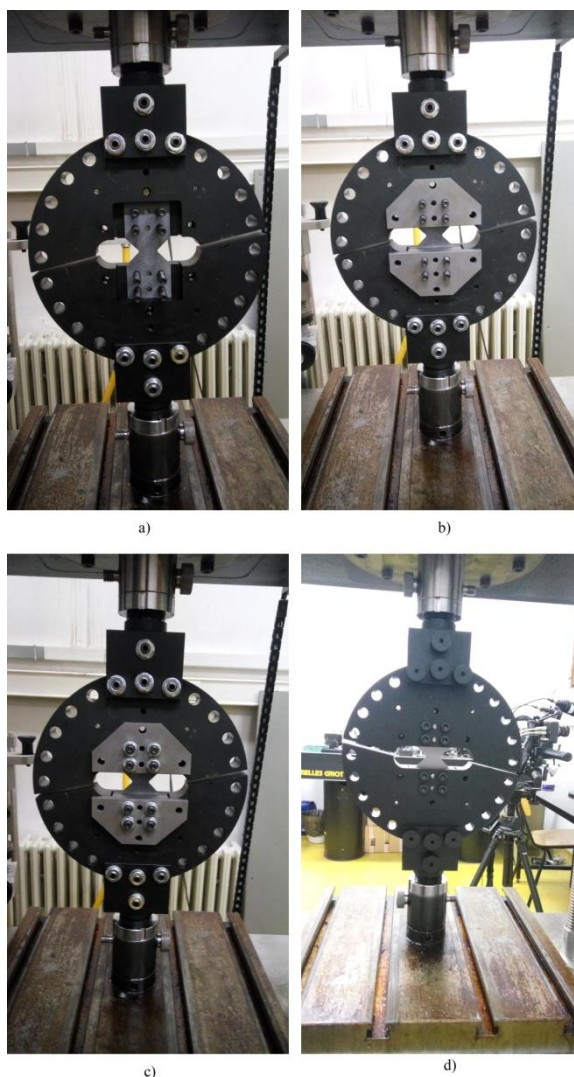
Ispitni uzorci izrađeni su od čelika DC01 debljine 3 mm. Dimenzije ispitnog uzorka te dimenzije promatrane zone prikazane su na slici 6.3. Širina promatrane zone je 30 mm, a duljina 48 mm. Pri nanošenju rastera na ispitni uzorak korišteni su sprejevi bijele i crne boje. Na ispitni uzorak prvotno je nanosena bijela mat boja a nakon toga su nanosene crne točkice crne boje kako bi se stvorio prepoznatljiv uzorak (Slika 6.2. b)). Svi eksperimenti provedeni su na statičkoj kidalici Beta 50-5 (Messphysik Austrija) brzinom od 5 mm/s.



Slika 6.3. Dimenzije ispitnog uzorka

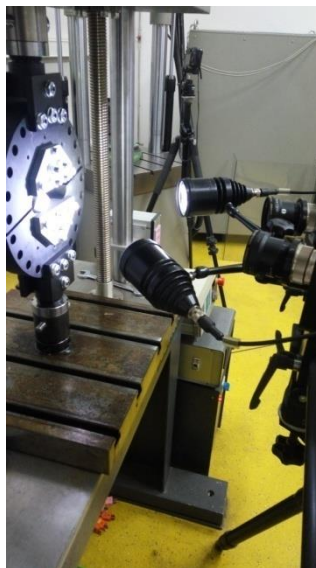
Kako bi se moglo provoditi ispitivanje potrebno je postaviti priхват na statičku kidalicu. Prvi korak je postavljanje adaptera, koji povezuju prirubnice s kidalicom, na pomični i nepomični dio statičke kidalice. Sljedeći korak je povezivanje prirubnica i adaptera pomoću svornjaka s navojem. Pri ispitivanju vlačnog opterećenja i kombiniranog vlačnog i smičnog opterećenja koriste se tri svornjaka, dok se kod smičnog opterećenja koriste 2 svornjaka. Kako bi se mogao postaviti ispitni uzorak potrebno je namjestiti razmak između prirubnica pomoću upravljačke jedinice statičke kidalice. Nakon postavljanja potrebnog razmaka u prirubnice postavlja se ispitni uzorak s pripadajućim vijcima (Slika 6.4. a)).

Nadalje, potrebno je postaviti tlačne prihvate za povezivanje ispitnog uzorka s prirubnicama (Slika 6.4. b)). Sljedeći korak je postavljanje svih potrebnih vijaka i matica kako bi se mogli tlačni prihvatiti povezati s ispitnim uzorkom (Slika 6.4. c)) i prirubnicama (Slika 6.4. d)). Svaki tlačni prihvati za povezivanje ispitnog uzorka s prirubnicom sa ispitnim uzorkom povezuju četiri vijka, četiri podloške te četiri matice, a sa samom prirubnicom ih povezuju tri vijka, tri podloške te tri matice.



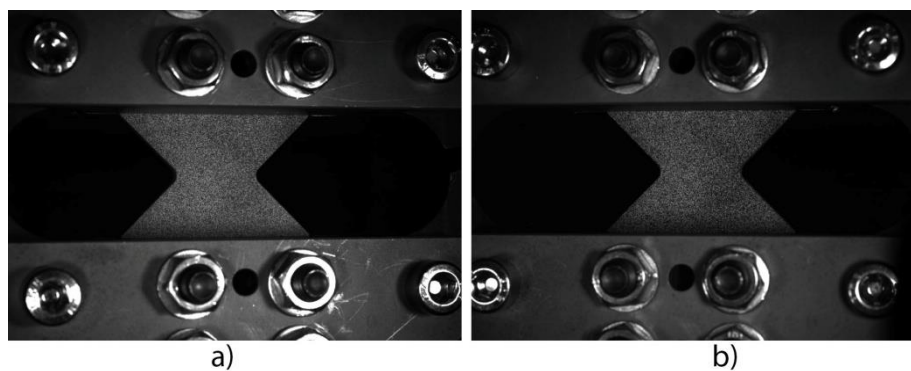
Slika 6.4. Postavljena prirubnica: a) s ispitnim uzorkom, b) s postavljenim tlačnim prihvatom, c) s postavljenim vijcima, podloškama i maticama, d) pogled na prihvati sa stražnje strane

Nakon postavljanja cijelog prihvata na kraljicu postavlja se optički sustav Aramis na točno određenu udaljenost od mjernog objekta. Izvori svjetla se po potrebi namještaju kako bi uzorak bio jednoliko osvijetljen (Slika 6.5.).



Slika 6.5. Postavljene kamere ispred prihvata

U programu *Aramis* može se vidjeti ispitni uzorak postavljen za ispitivanje vlačnog (Slika 6.6), smičnog (Slika 6.7) te kod kombiniranog smičnog i vlačnog opterećenja (Slika 6.8).



Slika 6.6. Slika postavljenog ispitnog uzorka za ispitivanje vlačnog opterećenja sa: a) lijeve kamere, b) desne kamere

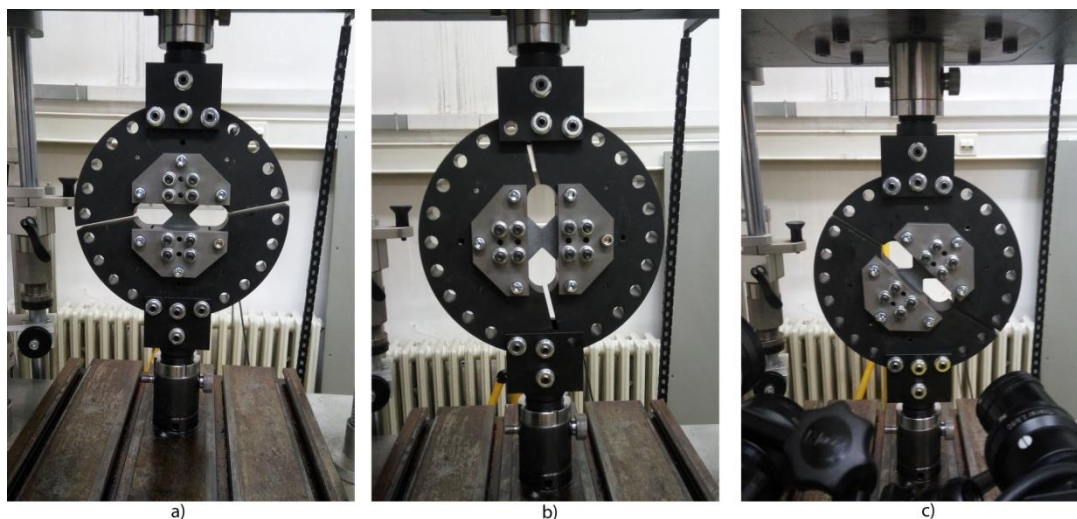


Slika 6.7. Slika postavljenog ispitnog uzorka za ispitivanje smičnog opterećenja sa: a) lijeve kamere, b) desne kamere



Slika 6.8. Slika postavljenog ispitnog uzorka za ispitivanje kombiniranog vlačnog i smičnog opterećenja sa: a) lijeve kamere, b) desne kamere

Kako bi se narinulo čisto vlačno opterećenje na ispitni uzorak, prihvat je postavljen tako da uzdužna os ispitnog uzorka gleda u smjeru gibanja traverze statičke kidalice (Slika 6.9. a)). Kod smičnog opterećenja na ispitni uzorak uzdužna os ispitnog uzorka zakrenuta je za 90° od vertikalne osi kidalice (Slika 6.9. b)), dok je kod kombiniranog opterećenja uzdužna os ispitnog uzorka zakrenuta za 45° (Slika 6.9. c)).



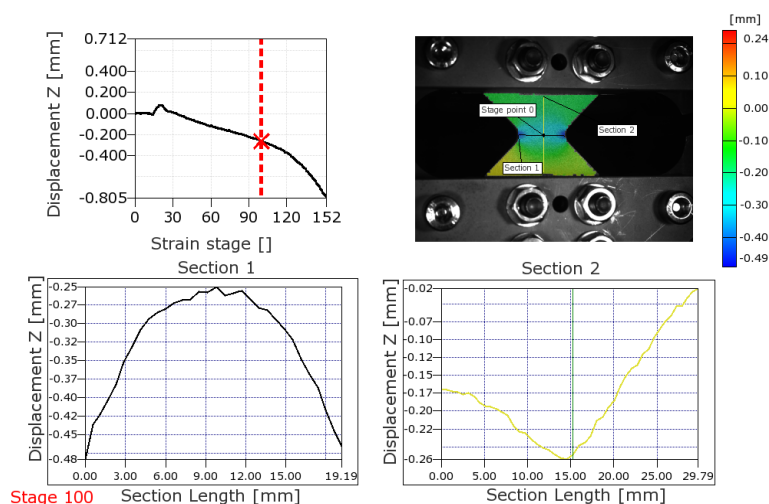
Slika 6.9. Položaj prihvata za: a) vlačno opterećenje, b) smično opterećenje, c) kombinirano smično i vlačno opterećenje

7. REZULTATI

Nakon provedbe eksperimenata uslijedila je obrada rezultata u programu *Aramis*. Rezultati obrada biti će prikazani u ovome poglavlju. U programu *Aramis* mogu se definirati željeni prikazi rezultata (*Report*), za bilo koji uslikani trenutak ispitivanja. Na sljedećim slikama biti će prikazan *Report* za provedena ispitivanja kod pomaka u smjeru osi *z* (*Displacement Z*) te deformacije po Misesu (*Mises Strain*) u ovisnosti o trenutku ispitivanja (*Strain stage*). U dijagramima se prate dva presjeka, uzdužni i poprečni presjek, koji prolaze kroz osi simetrije leptirastog ispitnog uzorka. Osim toga kod analize rezultata u obzir je uzeta točka koja se nalazi na sjecištu prethodno definiranih presjeka. Kod ispitivanja na vlačno i kombinirano opterećenje poprečni presjek ima naziv *Section 1*, a uzdužni ima naziv *Section 2*, dok kod ispitivanja na smično opterećenje uzdužni presjek ima naziv *Section 1*, a poprečni presjek ima naziv *Section 2*.

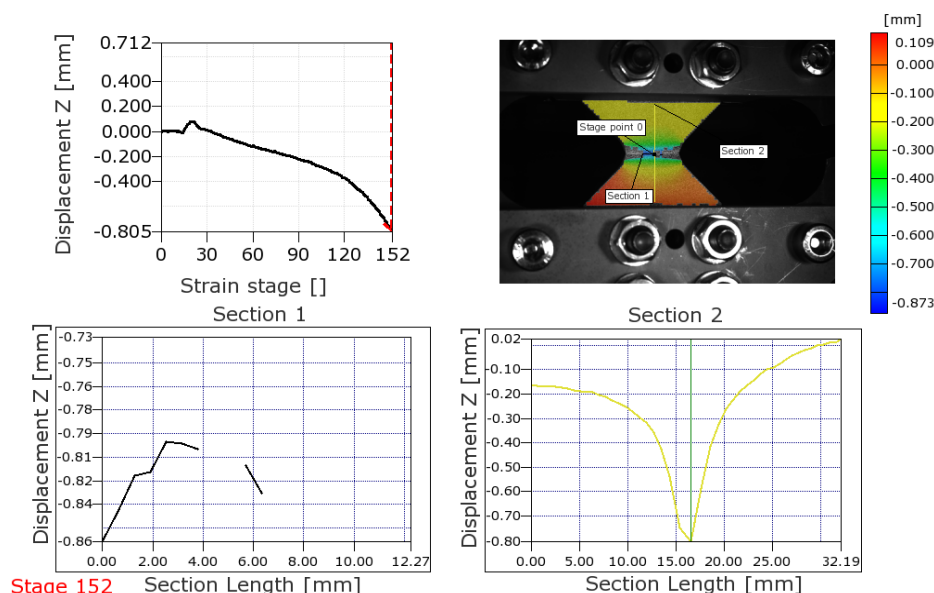
7.1. Ispitivanje vlačnim opterećenjem

Slika 7.1. prikazuje polje pomaka u smjeru osi *z* za iznos deformacije od 15,5% koja odgovara sili od 21,79 kN. Iz dijagrama za presjek *Section 1* može se očitati pomak u smjeru osi *z* na početku presjeka koji iznosi -0,48 mm. Na sredini presjeka pomak u smjeru osi *z* iznosi -0,25 mm, a na kraju presjeka iznosi -0,47 mm. Do tih pomaka dolazi uslijed stanjivanja materijala na poprečnom presjeku. Sa dijagrama za presjek *Section 2* može se očitati vrijednost pomaka u smjeru osi *z* na početku presjeka koji iznosi -0,17 mm, na sredini iznosi -0,26 mm, a na donjem kraju (tj. dijelu prihvata koji miruje) -0,02 mm. Razlika u pomacima na početku i kraju presjeka pokazuje kako dolazi do savijanja leptirastog uzorka uslijed pomaka gornje prirubnice Arcan prihvata. Pretpostavlja se da je izvan ravninsko savijanje uzrokovano zbog zračnosti između prirubnice, adaptera i kidalice koja rezultira nesimetričnim pomacima u presjeku *Section 2*.



Slika 7.1. Polje pomaka u smjeru osi z za Stage 100 za ispitivanje vlačnog opterećenja

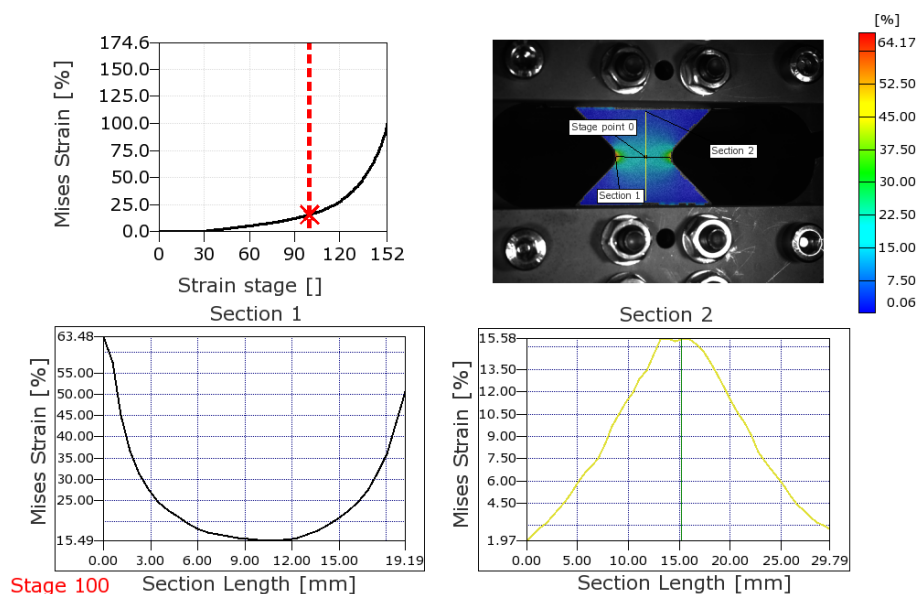
Slika 7.2. prikazuje polje pomaka u smjeru osi z za iznos deformacije od 99,43% koja odgovara sili od 14,67 kN, tj. trenutak prije loma ispitnog uzorka. Sa slike se može vidjeti kako program više ne prepoznaje raster na ispitnom uzorku te ne može prikazati polje pomaka na tim dijelovima. Do toga dolazi uslijed plastičnih deformacija ispitnog uzorka. S deformacijom materijala deformira se i raster te dolazi do njegovog zamučivanja tako da korelacijski algoritam ne može više prepoznati. Na početku presjeka *Section 2* pomak u smjeru osi z iznosi -0,18 mm, na sredini zabilježava vrijednost od -0,8 mm dok je donjem kraju 0,02 mm.



Slika 7.2. Polje pomaka u smjeru osi z za Stage 152 za ispitivanje vlačnog opterećenja

Slika 7.3. prikazuje polje deformacija po Misesu. Iz slike se može vidjeti kako je raspodjela deformacije po presjeku *Section 1* simetrična te se može napomenuti kako su najveće deformacije u vrhovima V zareza. Na početku presjeka, tj. u vrhu V zareza,

deformacija iznosi 63,48%, na sredini iznosi 15,49%, a na kraju presjeka 50%. Uočena deformacija na početku presjeka *Section 2* iznosi 1,97%, prema sredini presjeka iznos se povećava na 15,58%, a prema kraju presjeka se snižava na 2%.



Slika 7.3. Polje deformacije po Misesu za Stage 100 za ispitivanje vlačnog opterećenja

Slika 7.4. prikazuje deformirani ispitni uzorak s brojem 5 koji se ispitivao vlačnim opterećenjem. Na mjestu loma ispitnog uzorka može se jasno vidjeti pojava stanjivanja materijala.

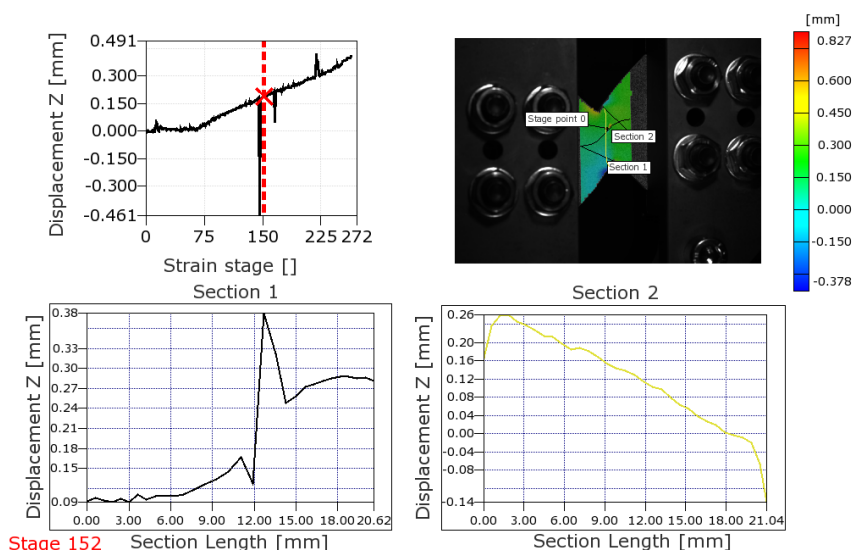


Slika 7.4. Deformirani ispitni uzorak uslijed vlačnog opterećenja

7.2. Ispitivanje na smično opterećenje

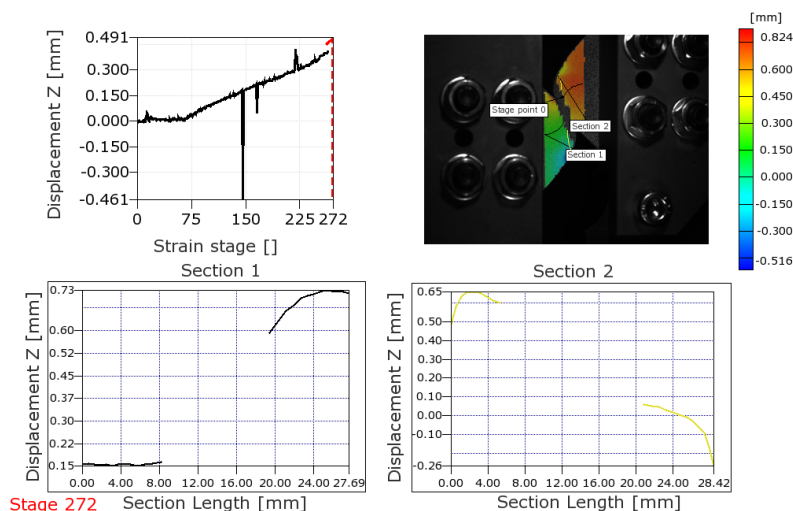
Slika 7.5. prikazuje polje pomaka u smjeru osi z za iznos deformacije od 87% koja odgovara sili od 17 kN. Na dijagramu za presjek *Section 2* može se vidjeti kako je pomak u smjeru z osi na početku presjeka pozitivan, a na kraju negativan. Pomak je na početku presjeka pozitivan jer dolazi do pojave gužvanja materijala kod smika te iznosi 0,26 mm. Na kraju presjeka dolazi do stanjivanja presjeka stoga je pomak u negativnom smjeru osi z te

iznosi -0,14 mm. Pomak na sredini presjeka iznosi 0,14 mm. Presjek *Section 1* je pozitivan po cijeloj duljini. Sa dijagrama može se očitati pomak na početku presjeka u smjeru osi *z* koji iznosi 0,09 mm koji se prema kraju povećava, na sredini 0,12 mm, a na kraju 0,28 mm.



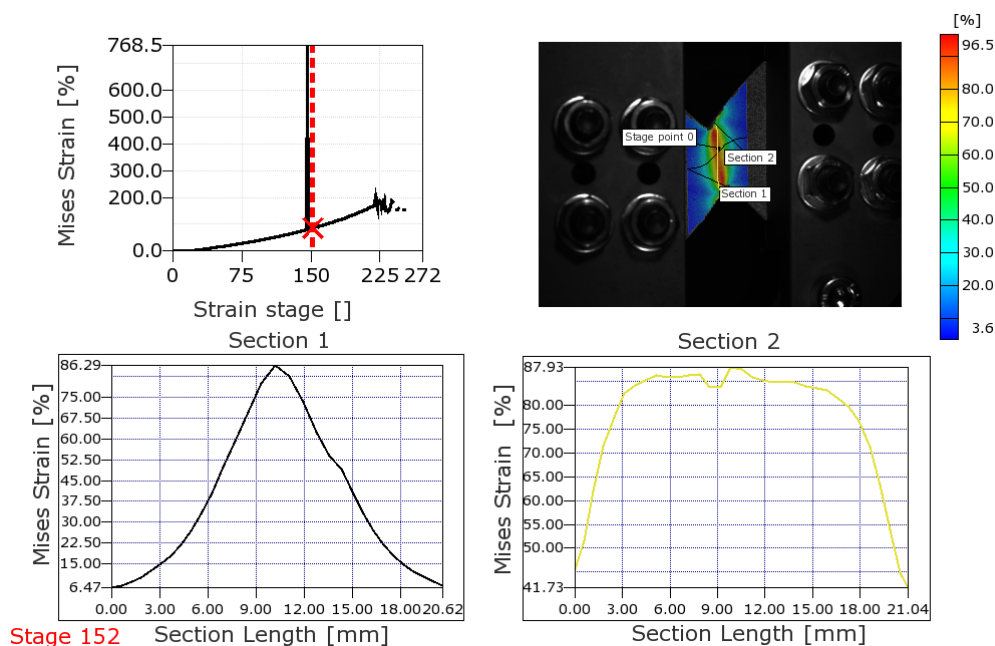
Slika 7.5. Polje pomaka u smjeru osi *z* za Stage 152 za ispitivanje jednostavnog smičnog opterećenja

Slika 7.6. prikazuje polje pomaka u smjeru osi *z* u trenutku prije loma ispitnog uzorka. Iz dijagrama se može vidjeti kako se gužvanje materijala na početku presjeka *Section 2* povećalo te je pomak u smjeru osi *z* zabilježena vrijednost od 0,65 mm. Na kraju presjeka se također stanjivanje materijala nastavilo te se pomak u smjeru osi *z* smanjio na -0,26 mm. Može se zaključiti kako je u gornjem V zarezu zabilježeno gužvanje u pozitivnom smjeru osi *z* dok je u donjem V rezultiralo negativnim pomakom. Na presjeku *Section 1* pomaci u smjeru osi *z* su se povećali. Vrijednost pomaka na početku presjeka iznosi 0,15 mm, a na kraju 0,73 mm.



Slika 7.6. Polje pomaka u smjeru osi *z* za Stage 272 za ispitivanje jednostavnog smičnog opterećenja

Slika 7.7. prikazuje raspodjelu polja deformacija po Misesu. Prema dijagramu za presjek *Section 1* može se vidjeti kako se sredina ispitnog uzorka najviše deformirala te iznosi 86,29%, a na početku i kraju presjeka deformacija je iznosila 6,47%. Dijagram za presjek *Section 2* je simetričan te prikazuje kako je većina deformacija koncentrirana u sredini ispitnog uzorka, a ne u vrhovima V zareza te postiže iznos od 87,93%. Na početku presjeka deformacija iznosi 45%, a prema kraju se snižava na 41,73%.



Slika 7.7. Polje deformacije po Misesu za Stage 152 za ispitivanje smičnog opterećenja

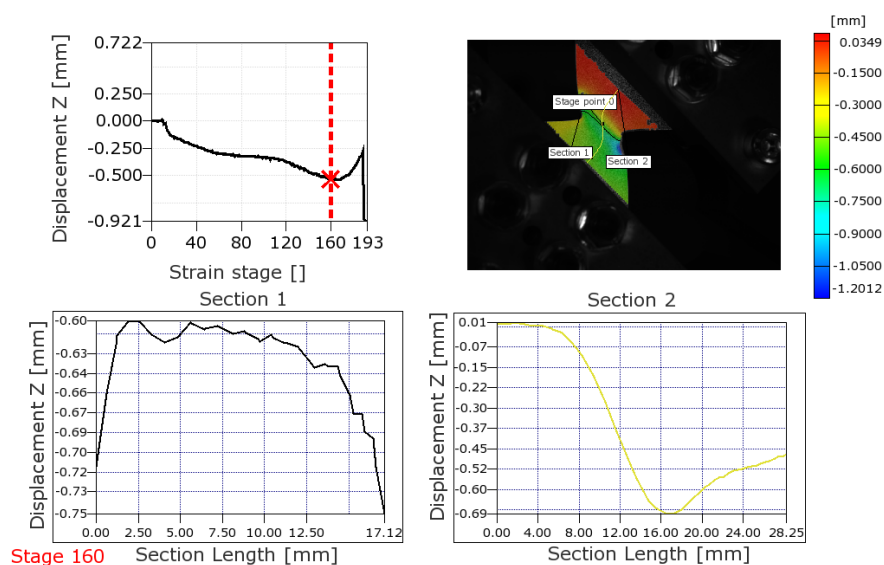
Slika 7.8. prikazuje deformirani ispitni uzorak s brojem 3 koji se ispitivao smičnim opterećenjem do loma. Na mjestu loma ispitnog uzorka može se jasno vidjeti pojava gužvanja materijala.



Slika 7.8. Deformirani ispitni uzorak uslijed smičnog opterećenja

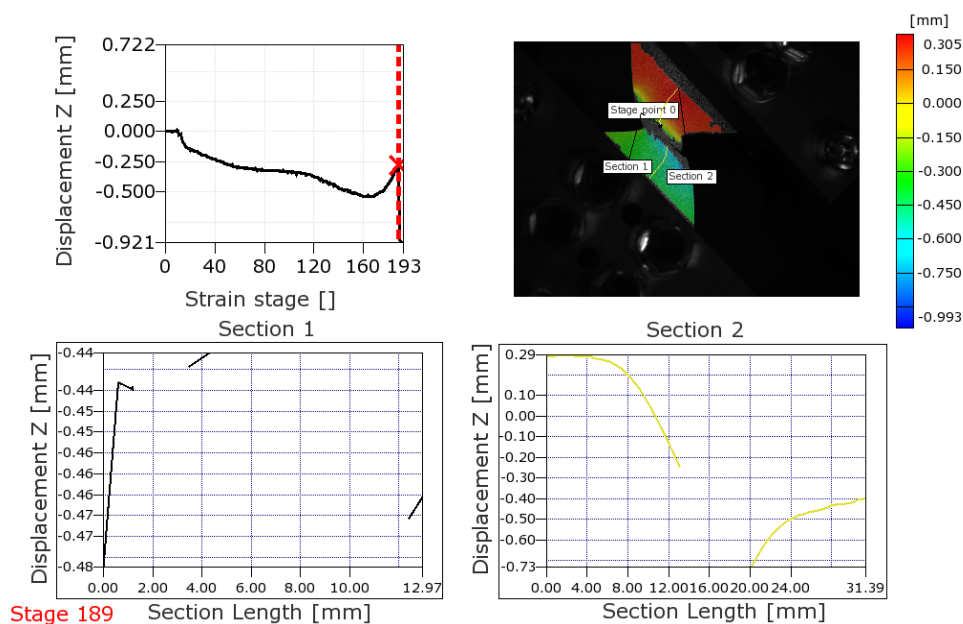
7.3. Ispitivanje na kombinirano vlačno i smično opterećenje pod 45°

Slika 7.9. prikazuje raspodjelu pomaka u smjeru osi z za iznos deformacije od 122,5% koja odgovara sili od 16,62 kN. Na dijagramu za presjek *Section 1* može se vidjeti kako je na kraju presjeka pomak u negativnom smjeru osi z većeg iznosa nego na početku presjeka te iznosi -0,75 mm. Na početku presjeka pomak iznosi -0,71 mm, a na sredini je postigao vrijednost od -0,6 mm. Kako je opterećenje kombinacija vlačnog i smičnog opterećenja, ono nije simetrično. Dolazi do blagog gužvanja materijala na gornjem dijelu presjeka, ali nije jako izraženo. Može se uočiti kako na početku presjeka *Section 2* pomak iznosi 0,01 mm, na sredini presjeka se pomak snizio na vrijednost -0,69 mm, na kraju presjeka iznos pomaka se povećao na -0,45 mm.



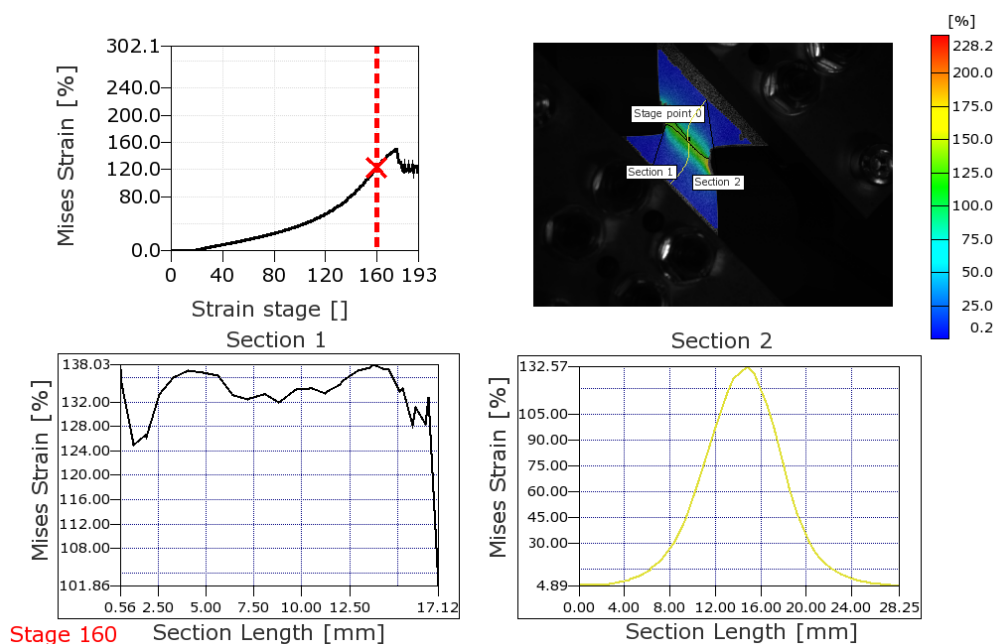
Slika 7.9. Polje pomaka u smjeru osi z za Stage 160 za ispitivanje kombiniranog opterećenja

Slika 7.10. prikazuje polje pomaka u smjeru osi z u trenutku prije loma ispitnog uzorka. Na početku presjeka *Section 2* može se vidjeti kako je pomak u smjeru osi z dostigao vrijednost od 0,29 mm, a na kraju presjeka je vrijednost pomaka iznosila -0,4 mm.



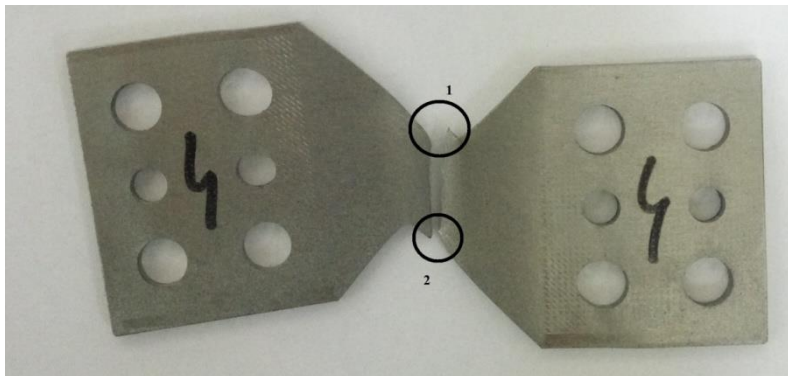
Slika 7.10. Polje pomaka u smjeru osi z za Stage 189 za ispitivanje kombiniranog opterećenja

Slika 7.11. prikazuje raspodjelu polja deformacija po Misesu. Prema dijagramu za presjek *Section 1* može se vidjeti kako su deformacije koncentrirane oko tog presjeka. Deformacije na početku presjeka dostižu vrijednost od 136%. Oko sredine presjeka može se očitati deformacija maksimalne vrijednosti od 138,03%, dok se na kraju presjeka deformacija smanjila na 101,86%. Može se primjetiti kako su na početku presjeka *Section 2* te na kraju deformacije iznosile 4,89%, a maksimalna vrijednost na sredini presjeka *Section 2* iznosi 132,57%.



Slika 7.11. Polje deformacije po Misesu za Stage 160 za ispitivanje kombiniranog vlačnog i smičnog opterećenja pod 45°

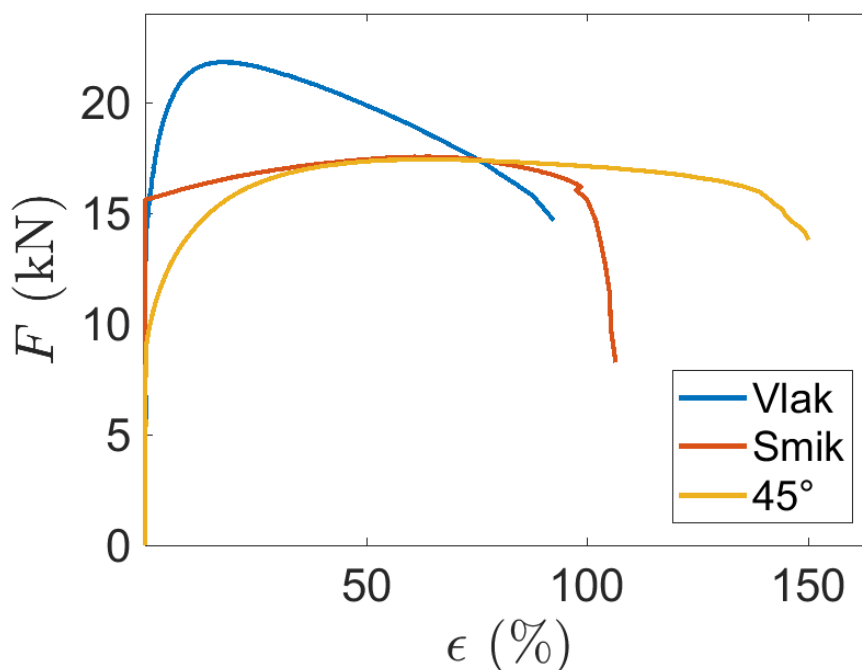
Slika 7.12. prikazuje ispitni uzorak nakon provedbe kombiniranog ispitivanja. Na mjestu loma može se jasno vidjeti kako je došlo do gužvanja materijala (1), ali ne u tolikoj mjeri kao kod ispitivanja na smično opterećenje. Uz gužvanje materijala zabilježeno je stanjivanje na najtanjem dijelu ispitnog uzorka (tj. u zoni između dva V zareza).



Slika 7.12. Deformirani ispitni uzorak uslijed kombiniranog vlačnog i smičnog opterećenja pod 45° . (1) i (2) označavaju zone gužvanja materijala.

8. DISKUSIJA

Nakon provedbe analiza polja pomaka i deformacija izmjerenih pomoću optičkog sustava *Aramis* u ovom poglavlju su uspoređeni globalni odziv materijala uslijed tri različita režima opterećenja. Budući da statička kidalica Beta 50-5 (Messphysik Austrija) i optički sustav *Aramis* neovisno zabilježavaju podatke bilo je potrebno povezati informacije iz dva različita izvora. Povezivanjem vremena zabilježenih slika te promjena sile u vremenu određena je međusobna ovisnost zabilježene sile i izmjerenih deformacija (Slika 8.1.). Za sva tri slučaja korišteni su ispitni uzorci izrađeni iz čelika DC01. Materijal ima visok modul elastičnosti tako da karakterističan nagib u elastičnom području nije zabilježen na dijagramu ovisnosti sile o deformaciji (Slika 8.1.).



Slika 8.1. Dijagram sile i ekvivalentne deformacije

	50% deformacije	100% deformacije	150% deformacije
Vlak, kN	19,81		
Smik, kN	17,43	15,64	
45°, kN	17,34	17,13	13,76

. prikazuje usporedbu sila očitanih iz upravljačke jedinice statičke kidalice za tri slučaja ispitivanja. Prilikom usporedbe izmjerenih podataka vidljivo je da je maksimalna sila zabilježena kod vlačnog opterećenja (21,83 kN). Istezljivost ispitnog uzorka prilikom opterećenja na vlak iznosi 92,5%. Nakon postizanja maksimalne sile započeo je trend smanjenja sile uslijed stanjivanja poprečnog presjeka na sredini ispitnog uzorka. Prilikom ispitivanja smičnim opterećenjem izmjerena je najveća sila od 17,55 kN. U nelineranom području može se primjetiti plastični plato u kojem nema velikih promjena sile kao što je zabilježeno kod ispitivanja leptirastog uzorka na vlak. Prije nastupanja loma izmjerena je deformacija od 106,5 %. Kod opterećenja ispitnog uzorka pod kutem od 45 ° zabilježena je maksimalna sila od 17,42 kN dok istezljivost iznosi 150,175%. U tablici 3. prikazana je usporedba maksimalnih zabilježenih sila za sva tri slučaja, a u tablici 4. prikazana je usporedba maksimalnih postignutih deformacija.

Tablica 2. Usporedba sila kod vlačnog, smičnog i kombiniranog opterećenja za tri karakteristične vrijednosti deformacije

	50% deformacije	100% deformacije	150% deformacije
Vlak, kN	19,81		
Smik, kN	17,43		
45°, kN	17,34	17,13	13,76

Tablica 3. Usporedba maksimalnih sila kod vlačnog, smičnog i kombiniranog opterećenja

	Maksimalna sila, kN
Vlak	21,83
Smik	17,55
45°	17,42

Tablica 4. Usporedba maksimalnih deformacija kod vlačnog, smičnog i kombiniranog opterećenja

	Maksimalna deformacija, %
Vlak	92,5
Smik	106,5132
45°	150,175

9. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedena su ispitivanja na višeosnom Arcan prihvatu koji se primjenjuje na jednoosnim kidalicama. Karakteristični leptirasti ispitni uzorci izrađeni su od čelika DC01 te su ispitani uslijed tri različita režima opterećenja (vlačnog, smičnog i kombiniranog opterećenja). Vlačno i smično opterećenje podjednako su zastupljeni kod kombiniranog opterećenja budući je Arcan prihvata pozicioniran pod kutem od 45° s obzirom na traverzu jednoosne kidalice. Tijekom ispitivanja korišten je stereo optički mjerni sustav *Aramis* temeljen na metodi korelacije digitalne slike. Primjenom predložene metode izmjerena su ravninska i izvanravninska polja pomaka i deformacija promatrane zone interesa (tj. između dva V zareza). Ispitni uzorci debljine 3 mm izrađeni od čelika DC01. Cilj ovoga rada bio je procijeniti izvan ravninsko savijanje leptirastog ispitnog uzorka uslijed predloženih režima opterećenja. Osim toga provedena je usporedba eksperimentalnih rezultata s numeričkim proračunom novorazvijenog Arcan prihvata.

Ispitivanja na vlačno, jednostavno smično te kombinano provedena su na statičkoj kidalici Beta 50-5 (Messphysik Austrija) brzinom od 5 mm/s. Prilikom ispitivanja na vlačno opterećenje izmjereno je izvan ravninsko savijanje ispitnog uzorka u prihvatu sa pomičnom prirubnicom Arcan prihvata. No međutim, na nepomičnom dijelu Arcan prihvata nije zabilježen pomak ispitnog uzorka po osi okomitoj na ravninu. Stoga se može zaključiti kako se radi o nesimetričnom izvan ravninskom savijanju što nije bio slučaj kod numeričkih simulacija. Pretpostavlja se kako je savijanje uzorka uslijed vlačnog opterećenja utjecala zračnost između prirubnice, adaptera i kidalice. Kako bi se odredio točan izvor nesimetričnih izvan ravninskih pomaka potrebno je optičkim sustavom *Aramis* provjeriti krutost prirubnica Arcan prihvata te izmjeriti promjenu pomaka uslijed opterećenja.

Tijekom smičnog opterećenja u vrhovima V zareza leptirastog ispitnog uzorka zabilježena je nesimetrična pojava gužvanja materijala. Fenomen gužvanje materijala zabilježen je kao pozitivan i negativan pomak u smjeru osi z u vrhu V zareza. Tijekom ispitivanja kombiniranog opterećenja također je izraženo gužvanje materijala uzrokovano smičnom komponentom opterećenja. Povezivanje podataka dobivenih iz kidalice i izmjerenih metodom korelacije digitalne slike dobiveni su dijagrami ovisnosti sile i deformacija za tri različita programa opterećenja leptirastog ispitnog uzorka. Iz predloženih rezultata može se zaključiti kako je maksimalna sila od 21,83 kN zabilježena kod vlačnog opterećenja. No

međutim, maksimalne ekvivalentne deformacije rezultirale su kod smičnog i kombiniranog opterećenja (150,17%).

LITERATURA

- [1] <http://www.zwick.co.uk/en/products/multi-axial-materials-testing-machines/biaxial-testing-machines/biaxial-testing-machines-with-electrical-synchronization.html>
- [2] Kraiem O., Houillon M., Schmitt N. and Zhao H.: Experimental and numerical investigation of the mechanical behaviour of an open-cell ceramic foam under multi-axial loadings, Arles, France, 2015.
- [3] Carpiuc-Prisacari A., Poncelet M., Kazymyrenko K., Leclerc H., Hild F.: A complex mixed-mode crack propagation test performed with a 6-axis testing machine and full-field measurements, Palaiseau, France, 2017.
- [4] <https://www.scribd.com/doc/22051398/PREDAVANJA>
- [5] https://www.academia.edu/9435777/KOLEGIJ_ISPITIVANJE_MATERIJALA
- [6] Pustaić, D.: Teorija plastičnosti i viskoelastičnosti, sažetak predavanja, Zagreb, 2009.
- [7] Alfirević, I.: Uvod u tenzore i mehaniku kontinuuma, Golden marketing Zagreb, 2003
- [8] https://hr.wikipedia.org/wiki/Youngov_modul_elasti%C4%8Dnosti
- [9] https://hr.wikipedia.org/wiki/Poissonov_omjer
- [10] <http://www.testresources.net/applications/test-types/shear-test/>
- [11] Alfirević, I.: Nauka o čvrstoći I, Tehnička knjiga Zagreb, 1995.
- [12] Magistris, F.: Wood fibre deformation and combined shear and compression, doctoral thesis, Stockholm, 2005.
- [13] Šimčak, F., Kalina, M., Orečny, M.: The Verification of Fixture for Shear Load with Optical Method ESPI, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Košice, Košice 2013.
- [14] Janković, D.: Diplomski rad, Zagreb, 2017.
- [15] Surjak, M.: *Validacija numeričkih modela mehaničkog ponašanja životinjskih i ljudskih kostiju*, Doktorsti rad, Zagreb, 2015.
- [16] Idek, V.: *Primjena mjernog sustava Aramis u analizi deformacija kod zavarivanja*, Diplomski rad, Zagreb, 2011.
- [17] Aramis user information – Hardware, GOM mbH, Njemačka, 2009.
- [18] Rončević, B.: Analiza kontaktnog problema sa smanjenjem kontakne površine, doktorski rad, Sveučilište u Rijeci, Rijeka 2012.